

**Evaluation der Schwingungsformen auf
Kondensatormikrofon-Membranen und
deren Einfluss auf den subjektiv
wahrgenommenen Klang der Wandler**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau

**von Dipl.-Ing. Oliver Sittler
geboren am 18.11.1976 in Würzburg**

vorgelegt am: 31.03.2014

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schade

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske
Dr. rer. nat. Claudia Freigang

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000478

Evaluation der Schwingungsformen auf Kondensatormikrofon-Membranen und deren Einfluss auf den subjektiv wahrgenommenen Klang der Wandler

Oliver Sittler

31.03.2014

Inhaltsverzeichnis

1. Kapitelübersicht	9
2. Grundlagen	10
2.1. Schallquellen, Klang und Ton	10
2.2. Kondensatormikrofone	14
2.2.1. Druckempfänger	16
2.2.2. Druckgradientenempfänger	17
2.3. Reziprozitätsmethode	20
2.4. Simulation von Schwingungen	21
2.5. Messsystem	23
3. Hörtests	26
3.1. Aufbau	26
3.2. Ergebnisse	34
3.3. Kapitelzusammenfassung	41
4. Messaufbau zur optischen Abtastung	42
4.1. Aufbau des Messplatzes	42
4.2. Signal- und systemtheoretische Betrachtung	47
4.3. Verwendete Messsignale	49
4.4. Messmethoden	53
4.4.1. Punktuell	53
4.4.2. Flächig	55
4.4.3. Zeiger-Methode	55
4.5. Auswertungsmethoden	56
4.5.1. Schnelle Fourier-Analyse (FFT)	56
4.5.2. Übertragungsfunktion	56
4.6. Ergebnisse der optischen Messungen	58
4.6.1. Visualisierung der punktuellen Messungen	58
4.6.2. 3D-Visualisierung der Schwingungen	68
5. Zusammenführung der objektiven und subjektiven Ergebnisse	74
5.1. Einfluss der Schwingung auf den Klang	74
5.2. Entwicklung eines Demonstrators	76
6. Zusammenfassung und Ausblick	78

Literaturverzeichnis	81
A. Prüflinge und Aufbau der Hörtests	97
A.1. M296, Microtech Gefell	98
A.2. MK301, Microtech Gefell	99
A.3. Dreieckskapsel, Ehrlund	100
A.4. Rechteckskapsel ELMC, Pearl	101
A.5. KM184, Neumann	102
A.6. M300, Microtech Gefell	103
A.7. M70 Nickelmembran, Microtech Gefell	104
A.8. M70 PET-Membran, Microtech Gefell	105
A.9. M71 PET-Membran symmetrisch, Microtech Gefell	106
A.10.M71 PET-Membran asymmetrisch, Microtech Gefell	107
A.11.M71 PVC-Membran symmetrisch, Microtech Gefell	108
A.12.C414B ULS, AKG	109
A.13.U87Ai, Neumann	110
A.14.M930, Microtech Gefell	111
A.15.Aufnahme- und Wiedergabesetups	112
A.16.STEP-Software	113
B. Ergebnisse der Hörtests (Auszug)	114
B.1. Clusterbildung	114
B.2. Levene-Tests	116
B.3. Bewertungen/Signifikanztabellen	117
B.3.1. Bass/Höhen-Balance	117
B.3.2. Natürlichkeit	122
B.3.3. Nähe	127
B.3.4. Transparenz	132
B.3.5. Allgemeines Ranking	137
C. Darstellung von Membranschwingungen (Auszug)	140
C.1. Punktuelle Messung von Rechteckimpulsen	140
C.1.1. Druckempfänger, Übertragungsfunktionen bei 2 V Burst	140
C.1.2. Gradientenempfänger, Übertragungsfunktionen bei 2 V Burst	142
C.2. Flächenscan mit Sinus-Anregungssignal (reziprok)	143
D. Prototypen/Messergebnisse/Auswertungen (Auszug)	149
D.1. Hochvolt-Verstärker (Neuentwicklung)	149
D.2. MK221 mit Variationen in Membranmaterial und -dicke (Prototypen)	150
D.2.1. Amplituden - Frequenzgänge	150
D.2.2. Übertragungsfunktionen (optische Abtastung, Chirp-Anregung)	153
D.3. M71-Kapseln, symmetrisch und asymmetrisch (Prototypen)	156
D.4. M71-Kapseln mit Goldsegmenten (Prototypen)	157
D.5. Doppelelektroden-Mikrofon mit segmentierter Elektrode (Neuentwicklung)	159

Formelzeichen und Symbole

* Faltungsoperation

γ_{mn} Nullstellen der Besselfunktion

λ Wellenlänge, $[\lambda]=1/\text{s}$

$\delta(t)$ Dirac-Impuls

π Kreiszahl, $\pi=3,14159\dots$

ρ Dichte, $[\rho]=\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$

τ Übertragungsfunktion des Systems

a_i Proportionalitätsfaktoren (konstante Koeffizienten)

c Lichtgeschwindigkeit, $[c]=\text{m/s}$

E Elastizitätsmodul, $[E]=\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

f_1, f_2 untere, obere Grenzfrequenz eines Chirps, $[f]=1/\text{s}$

F_{max} Verhältnis der größten und kleinsten Gruppenvarianz (Hörtest-Datenanalyse)

f_{res} Resonanzfrequenz, $[f]=1/\text{s}$

$g_i(t)$ Ausgangssignale

G_s Eigenverhalten des Übertragungssystems

$h(t)$ Impulsantwort

J_m Besselfunktion

r Membranradius, $[r]=\text{mm}$

$s_i(t)$ Eingangssignale

T Gesamtlänge eines Chirps, $[T]=\text{s}$

t Zeit, $[t]=\text{s}$

U_s Eingangsgröße des Übertragungssystems

Y_s Ausgangsgröße des Übertragungssystems

Kurzfassung/Abstract

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden zur berührungslosen Erfassung von Schwingungsformen auf Kondensatormikrofon-Membranen mittels eines laserinterferometrischen Messsystems gezeigt. Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen werden mit denen eines Experten-Hörtests verglichen. Ziel ist es, die Schwingung der Membran bei unterschiedlichen Anregungssignalen zu zeigen und herauszufinden, wie sich diese Schwingung auf den Klang der Kapsel auswirkt. So kann das Schwingungsverhalten der Membran und damit der Klang einer Kapsel bereits bei der Konstruktion gezielt beeinflusst werden. Hierzu werden unterschiedliche Kapselkonstruktionen (in geometrischer Form, Größe und Ausführung - sowohl Druck- als auch Gradientenempfänger) und Membranmaterialien untersucht und die Ergebnisse miteinander in Verbindung gesetzt. Anhand der gemessenen Schwingung lassen sich u.a. Aussagen darüber treffen, warum Kunststoff- und Metallmembranen unterschiedlich klingen. Es wird gezeigt, wie sich eine Veränderung der mechanischen Vorspannung der Membranen und eine Variation in Dicke und Material auf deren Schwingung auswirkt. Außerdem wird erklärt, wie es möglich ist, mit Hilfe der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Messreihen, die Übertragungsfunktionen der jeweiligen Prüflinge auf beliebige Audiosignale umzulegen. Somit können Klangeigenschaften von Kapselkonstruktionen und den verwendeten Membranmaterialien simuliert werden. Auf einer runden Membran bewegt sich Rand- und Mittenbereich frequenzspezifisch unterschiedlich. Dieser Effekt wird beim Bau eines Demonstrators ausgenutzt. Die Konstruktion ermöglicht es, Signale der Schwingung von unterschiedlichen Membranbereichen voneinander unabhängig elektroakustisch zu wandeln.

The following thesis shows different methods of non-contacting laser-interferometric measurements tracking condenser-microphone membranes in motion. The results of these measurements are compared with the results of an listening comparative test of different microphones conducted with experts. The individual movement of the membrane on different stimulus-signals is analyzed to detect correlation of membrane movement and the sound of a capsule. With the data of the individual membrane-movement the sound of a capsule can be already manipulated in the construction-state of any microphone. Different capsules (varying in geometrical form, size and format - pressure- und pressure-gradient microphones) and different membrane-materials were analyzed and the results were compared. The database of conducted measurements enables to explain differences in the sound by synthetic and metallic membranes. Furthermore effects of different membrane tension and variations of membrane thickness and -material were analyzed. In addition the creation of transfer functions of the different test samples is explained, including its usage on arbitrary audio-signals. By that specific sound characteristics of capsule-constructions and different membrane materials can be simulated. The border area of a circular membrane moves different compared to the middle area in different frequencies. This effect is used to build a demonstrator of a newly developed microphone. This construction enables the conversion of independent acoustic signals coming from different parts of the membrane to electric signals.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen Menschen bedanken, die mich bei meiner Arbeit in den vergangenen Jahren unterstützt haben und ohne die eine Umsetzung nicht möglich gewesen wäre.

Mein Dank gilt dem Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau in Person von Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schade, der für meine Ideen jederzeit offen und diskussionsbereit gewesen ist und mich bei der wissenschaftlichen Umsetzung der Arbeit enorm weitergebracht hat.

Ebenso möchte ich mich bei der Firma Microtech Gefell bedanken, die durch die Lieferung der Prüflinge sowie durch die fachliche Unterstützung einen Beitrag zu meiner Arbeit geleistet hat. Der Dank gilt besonders Jochem Kühnast, Bernd Kraus, Dipl.-Ing. Udo Wagner, sowie der Geschäftsleitung in Person von Dipl.-Ing. Matthias Domke, die mich durch das entgegengebrachte Vertrauen und viele konstruktive Gespräche in meiner Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank geht an die Firma SIOS Messtechnik GmbH in Person von Dr.-Ing. Walter Schott, Dr.-Ing. Denis Dontsov, Dr. Ralf Schüler sowie Dr.-Ing. Wolfgang Pöschel und Dipl.-Ing. Enrico Langlotz, die die verwendete Messtechnik zur Verfügung gestellt und mir bei allen auftretenden Problemen mit viel Engagement den Rücken gestärkt haben.

Danke auch an Dipl.-Ing. Immanuel Claashen und Christian Schneiderwind, die mit viel Engagement und großer Motivation ihre Projekte realisierten und damit einen wichtigen Beitrag zur vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Der Freistaat Thüringen trug durch die Finanzierung des Projektes “Bionisch inspiriertes Mikrofon” einen besonderen Teil zu meiner Arbeit bei. Dabei ist besonders die Kooperation mit den bereits genannten Firmen, sowie dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhardt Manske und dem Institut für Biomechatronik, Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. Hartmut Witte und Dipl.-Ing. Tobias Schmidt zu erwähnen, die enorm motivierend war.

Außerdem geht ein großer Dank nach Schweden zu Håkan Lindberg, der von Anfang an Fan meiner Untersuchungen gewesen ist und mich in der gebotenen Form mit seinem Wissen unterstützt und meinen Willen gestärkt hat, die vorliegende Arbeit überhaupt anzugehen. Mein herzlicher Dank für die besondere Motivation und mentale Unterstützung an Cathrin Lange und Winfried Kortenbruck.

Vielen Dank auch meinem Vater für seine Hilfe und die Korrektur der Arbeit, meinen Freunden und allen weiteren Menschen, die zwar nicht namentlich genannt sind, mich aber trotzdem in den vergangenen sieben Jahren unterstützt und weitergebracht haben. Vielen Dank!

Motivation

Seit über 85 Jahren werden Kondensatormikrofone in Serienfertigung gebaut. Sie wandeln Luftschall in elektrische Impulse. Diese können aufgezeichnet werden. Verschiedene Mess- und Kalibriermethoden wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt, die diese elektrischen Signale betrachten und bewerten. Gebräuchlich ist die Bestimmung des Amplituden-Frequenz- und Phasengangs mit Hilfe von Sinussignalen. Die Kalibrierung der Kapseln erfolgt durch Multisinus-Messungen [43]. Peus betrachtet in seinen Untersuchungen das Impulsverhalten von Mikrofonen [89]. Die genannten Verfahren lassen jedoch keinerlei Aussage zu den tatsächlichen mechanischen Membranschwingungen der Wandler zu.

Verschiedene Kapselkonstruktionen und Membranmaterialien bedingen ein individuell unterschiedliches Klangverhalten von Mikrofonen. Dies äußert sich in der Praxis dadurch, dass Tonmeister für die Aufnahme von verschiedenen Quellen jeweils andere Mikrofone auswählen. Ausgehend von der Annahme, dass unterschiedliche Kapselkonstruktionen und Membranmaterialien unterschiedliche Schwingungsbilder hervorrufen, soll versucht werden, von der rein mechanischen Schwingung Rückschlüsse auf klangliche Parameter der Wandler zu ziehen.

Mit der Entwicklung von berührungslosen, optischen Messverfahren und deren Optimierung hinsichtlich der Messauflösung wird die Betrachtung der mechanischen Membranschwingung möglich. Diese Untersuchung erfordert eine hohe Genauigkeit des Messsystems, da Schwingungen mit einer Amplitude von wenigen Nanometern abgetastet werden müssen. Bei der vorliegenden Arbeit wurde auf ein Homodyninterferometer zurückgegriffen.

Ziel ist es, mit Hilfe von objektiven Messmethoden zur Schwingungserfassung von Kondensatormikrofon-Membranen eine Korrelation zu den subjektiven Höreindrücken eines Expertenhörtests zu bekommen. Hierzu mussten neuartige Untersuchungsmöglichkeiten von schwingenden Mikrofonmembranen erarbeitet werden. Dazu gehören Messaufbauten, geeignete Messsignale und abgestimmte Auswertungsroutinen. Die Ergebnisse der Hörtests und der optischen Abtastung sollen am Ende derart vergleichbar werden, dass Aussagen über die Schwingung von unterschiedlichen Membranen (Größe, Form und Material) getroffen werden können. Diese sollen Rückschlüsse auf den Klang zulassen, um ein wenig Licht in die Mikrofonwahl der Toningenieure bei unterschiedlichen Klangquellen zu bringen.

Parallel hierzu werden die Schwingungen der Membranen untersucht. Dies sollte mög-



Abbildung 0.1.: Georg Neumann und Erich Kühnast beim Experimentieren am Mikrofon [45]

lichst vollumfänglich erfolgen. Entsprechend kommen zur Schwingungsanregung sowohl impulshafte Signale (Rechteck- und Burst) als auch stationäre Sinussignale zum Einsatz. Außerdem wird die Schwingung bei Anregung durch Multisinustöne und Rauschen betrachtet.

Zur Untersuchung der Mikrofonmembranen wurde ein entsprechender Messplatz entwickelt und aufgebaut, der die genannten Signale zur Schwingungsanregung zulässt, unterschiedliche Kapselkonstruktionen untersuchbar macht und letztendlich vergleichende Messungen erlaubt.

Zusätzlich wurden die Ergebnisse der einzelnen Messreihen unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Analysemethoden untersucht und beurteilt. Neben der Betrachtung der Schwingung im Zeitbereich kam hier die sogenannte schnelle Fourier-Transformation¹ in verschiedenen Matlab-Routinen zum Einsatz. Es wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, die schwingende Membran in einem geeigneten Raster zu scannen und anschließend die resultierende Schwingung der gesamten Fläche zu visualisieren.

Aus den Messergebnissen können - bei bekannten Anregungssignalen - die Übertragungsfunktionen der Kapseln bestimmt werden. Diese ermöglichen die Transformation der Schwingungsmessung zu einer Übertragung der individuellen Schwingungseigenschaften (bspw. in der Audio Post-Produktion oder mit Hilfe eines Audio-Plugins) auf eine Klang-Simulation von Kapselkonstruktionen.

Erkenntnisse der Arbeit konnten in der Entwicklung eines Demonstrators bereits umgesetzt werden, die klanglichen Eigenschaften werden betrachtet.

¹fast Fourier transform - kurz: FFT

1. Kapitelübersicht

In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Kondensatormikrofone bzw. deren Kapseln mit Hilfe von subjektiven und objektiven Methoden untersucht, die Ergebnisse miteinander in Verbindung gebracht und letztendlich der subjektiv wahrgenommene Klang der Kapseln auf die individuellen Schwingungsformen zurückgeführt.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen für die vorliegenden Untersuchungen erläutert, Ton und Klang als subjektive Parameter definiert, das berührungslose Messsystem für die Ermittlung der objektiven Ergebnisse aufgezeigt und erklärt. Anschließend erfolgt die Betrachtung der zu untersuchenden Mikrofone, bzw. den, der Schallwandlung zugrunde liegenden Prinzipien. Die betrachteten Kapseln sind sowohl Druck- als auch Druckgradientenempfänger, deren Membranen hauptsächlich mit Hilfe des Reziprozitätsverfahrens zur Schwingung angeregt werden. Eine Übersicht über verschiedene Simulationen von Schwingungsmoden auf rotationssymmetrischen Membranen und Kapselsystemen als zu erwartende Messgrößen runden dieses Kapitel ab.

Im folgenden Kapitel 3 wird erklärt, welche Prinzipien bei der Entwicklung eines Expertenhörtests zur Evaluierung der subjektiven Klangeindrücke der unterschiedlichen Kapselkonstruktionen beachtet werden mussten. Es wird gezeigt, welche Attribute zur Einteilung der Kapseln und Auswahl der Schallereignisse herangezogen wurden. Die Gründe hierfür werden ebenso erläutert, wie die Auswahl von unterschiedlich gearteten Klangbeispielen. Nach einer Übersicht über Aufbau und Durchführung der Hörtests werden die Ergebnisse der subjektiven Beurteilungen gezeigt und erklärt.

Nachdem die traditionell elektrisch gemessenen Amplituden- Frequenzgänge ein zwar gebräuchliches Mittel zur Unterscheidung der Parameter von Kondensatormikrofonen darstellen, jedoch im vorliegenden Fall nicht taugen, um die feinen Unterschiede aufzudecken, die bei den Hörtests auffallend waren, mussten neuartige Möglichkeiten der Messung gefunden werden. Diese werden in Kapitel 4 gezeigt. Darüber hinaus wird ausgeführt, welche Kriterien zum Aufbau eines Messplatzes zur objektiven Schwingungsanalyse beachtet werden mussten. Die Hintergründe der signal- und systemtheoretischen Betrachtung werden eingeführt, die die Grundlage für die vorliegenden Messungen und Auswertungen bilden. Eine Übersicht über die verwendeten Messsignale sowie die -methoden und Auswertungsroutinen werden erläutert. Ebenso erfolgt die Betrachtung und Interpretation der Ergebnisse aus den objektiven Messreihen.

In Kapitel 5 werden letztendlich die subjektiven mit den objektiv ermittelten Ergebnissen verglichen und somit der Einfluss der Schwingung auf den individuellen Klang der untersuchten Kapseln evaluiert.

Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 6 runden die Arbeit schließlich ab.

Im Anhang finden sich weiterführende Messergebnisse und Schwingungsbilder.

2. Grundlagen

2.1. Schallquellen, Klang und Ton

Nach Terhardt [116] werden alle Arten von Schallquellen als ein System beschrieben, welches aus einem Generator und einem Resonator besteht. Der Generator versetzt den Körper oder Luftraum des Resonators entweder durch eine stationäre oder durch eine einmalige impulsartige Energiezufuhr in Schwingung. Daraus lassen sich zwei Hauptklassen von Schallquellen ableiten: stationäre und abklingende (siehe Abbildung 2.1). Bei stationären Schallquellen spricht man nach Terhardt [116] von Quellen der ersten, bei abklingenden von Quellen der zweiten Klasse.

Quellen der ersten Klasse erzeugen stationäre, periodische Schwingungen, deren Spektrum aus harmonischen Obertönen besteht. Für die meisten Signaleigenschaften ist der Generator verantwortlich. Der Resonator fügt dem Generatorsignal vor allem Klangfärbungen hinzu, welche durch Änderungen im Fourierspektrum gekennzeichnet sind. Bei vielen Quellen der ersten Klasse gibt es eine Rückwirkung des Resonators auf den Generator. Beispiele für Quellen der ersten Klasse sind die menschliche Stimme sowie Blas- und Streichinstrumente.

Quellen der zweiten Klasse erzeugen abklingende Schwingungen, welche aus annähernd sinusförmigen Eigenschwingungen des Resonators zusammengesetzt sind. Die Merkmale der Signale dieser Klasse werden hauptsächlich durch den Resonator bestimmt, der durch den mechanischen Impuls des Generators angeregt wurde. Die Zusammensetzung der Frequenzen steht im Allgemeinen nicht im Verhältnis ganzer Zahlen. Beispiele für die Quellen der zweiten Klasse sind Klavier, Gitarre und Schlagzeug [116].

Die Klangfarbe hängt zum Einen von der Quelle, also dem Instrument oder einer anderen Schallquelle, zum Anderen auch von der Senke - in diesem Fall dem Mikrofon - ab. Abhängig von der Kapsel-Konstruktion und den verwendeten Materialien wird der auftretende Schall geringfügig anders elektrisch gewandelt, die Mikrofone klingen somit unterschiedlich [17, 25, 47, 48]. Dieser Umstand soll später genauer betrachtet werden.

Nach Zollner/Zwicker [136] bestehen Klänge im musikalischen Sinne aus mindestens zwei Tönen, die nicht dieselbe Grundfrequenz haben. Zwischen der physikalischen und

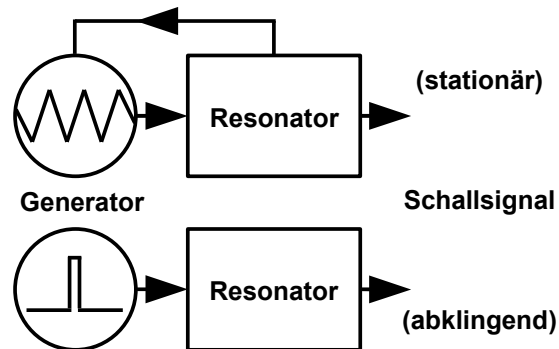


Abbildung 2.1.: Klassen von Schallquellen, nach [116]

der musikalischen Betrachtungsweise eines Tones bestehen die folgenden Unterschiede: Physikalisch ergibt sich ein Ton aus einem “reinen Ton”, also einer einfachen Sinusschwingung. Diese ist jedoch ausschließlich elektrisch herstellbar und kommt in der Natur nicht bzw. kaum vor (lediglich die Orgel ist näherungsweise ein Sinusschwinger, allerdings kommen auch hier durch den Klangkörper der Orgelpfeifen die entsprechenden Obertöne hinzu). Entsprechend spricht man von einem “natürlichen Ton” im musikalischen Sinne, wenn dieser zwar aus regelmäßigen Schwingungen besteht, die letztendlich jedoch nicht notwendigerweise Sinusschwingungen sind. Zusätzlich besteht jeder musikalische Ton aus einem Gemisch von zusätzlichen Elementen, die durch die physikalische Bauart des Klangkörpers und Instrumentes beeinflusst werden (bspw. nicht angeschlagene, aber mitschwingende Saiten bei Gitarre oder Klavier) und einem Obertonspektrum von zum Grundton in aller Regel harmonischen Schwingungen. In jedem Ton sind noch verschiedene weitere Geräusche enthalten (z.B. der Geigenbogen, der beim ersten Aufsetzen ein Geräusch entwickelt, welches dann zu einem Ton wird). Will man diese Signale aufzeichnen, müssen alle genannten Elemente adäquat elektrisch gewandelt werden [136].

Abbildung 2.2 zeigt den modellhaften Aufbau eines Klanges. Nach Meyer [80] gilt:

Für die Tonhöhe ist die Grundfrequenz entscheidend: Je höher diese ist, desto höher klingt der Ton. Man spricht dabei von der melodischen bzw. harmonischen Ebene. Diese ist auf der X-Achse gezeigt.

Die Lautstärke ist der Schalldruckpegel eines Tones oder Klanges, gemessen in dB. Er bildet die dynamische Ebene auf der Y-Achse.

Die Z-Achse gliedert den Klang zusätzlich in drei zeitliche Zustände:

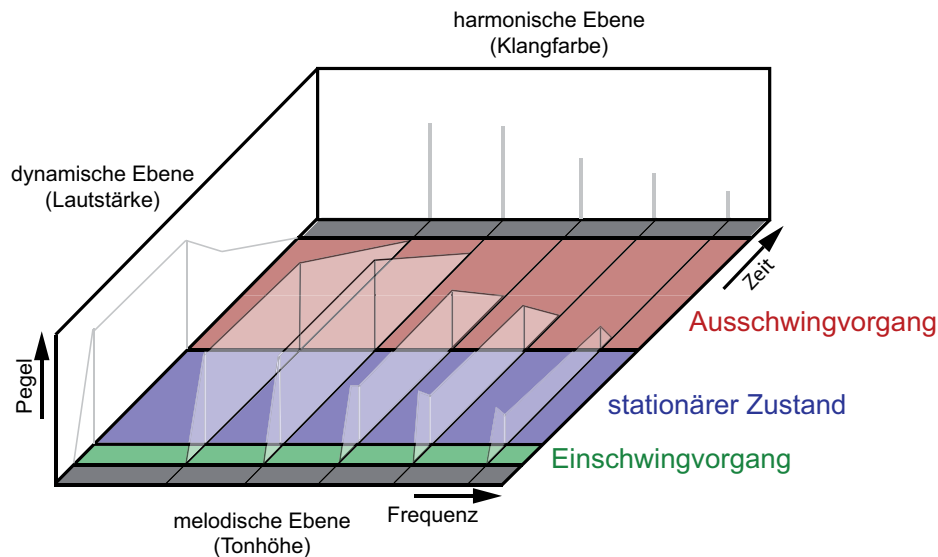


Abbildung 2.2.: Aufbau eines Klanges, nach Frequenz, Pegel und Zeit, Modellvorstellung nach [80]

Einschwingvorgang Der Einschwingvorgang oder Klangeinsatz ist der Zeitabschnitt, in dem sich der Klang aus der Ruhe bis zu einem eingeschwungenen Zustand entwickelt. Dieser ist psychoakustisch maßgeblich für die Zuordnung des Klanges zu einem Instrument bzw. einer Quelle verantwortlich [32]. Er macht es überhaupt möglich, dass wir ein Instrument identifizieren können. Der Mensch lernt mit dem Hören, verschiedene Klangkörper hauptsächlich mit Hilfe des Einschwingvorgangs zu unterscheiden. Aus diesem sogenannten Transienten¹ bestimmt unser Gehirn darüber hinaus noch eine Richtungszuordnung. Oft sind im Transienten Klangkomponenten enthalten, die im späteren Verlauf des Klanges oder Tones gar nicht mehr vorkommen. Tests haben gezeigt, dass sogar Musiker den Klang einer Geige gegenüber dem eines Pianos nicht abgrenzen können, wenn dieser Einschwingvorgang nicht mehr zu hören ist [80]. Dem sprunghaften Anstieg zum Beginn einer Schwingung (z.B. Anschlag der Klaviersaite) kommt demnach eine besondere Bedeutung zu, die später im Rahmen der Messungen und Auswertungen auch gesondert betrachtet werden muss.

Stationärer Zustand Der stationäre oder eingeschwungene Zustand ist der Zeitabschnitt, in dem der Klang als relativ unveränderlich betrachtet werden kann [80]. Ein stationärer Zustand wird streng genommen nur bei solchen Instrumenten erreicht, bei denen eine ganz gleichmäßige Anregung der Schwingung erfolgt. Dies sind vor allem jene Instrumente, die nicht die Energie des Spielers, sondern eine fremde (starre) Energiequelle benutzen, wie z.B. die Orgel oder manche elektronische Instrumente (also Klänge der ersten Ordnung). Minimale Luftdruckschwankungen bei Bläsern oder die Bogendruckänderungen der Streicher führen jedoch zu geringfügigen Schwankungen im Schwingungsablauf. Entsprechend spricht man in der Praxis von einem quasistationären Zustand [32].

Er lässt Schlüsse über Fülle und Spektrum der Klangquelle zu, es lassen sich Aussagen zum jeweiligen Resonanzkörper treffen. Aus der Amplitude ergibt sich die Lautstärke. Die Klangfarbe der Quelle verändert sich je nach Verhältnis der Grund- und Teiltöne sowie des Rauschanteils zueinander. Ein reiner Ton klingt beispielsweise eher weich und angenehm. Obertöne, auch *Partialtöne* oder *Harmonische* genannt, sind Teiltöne eines Klanges, also Bestandteile der Überlagerung mehrerer einzelner Töne. Sie haben Frequenzen, die i.d.R. ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz des Klanges sind. Auch die Zusammensetzung dieser Obertöne hilft maßgeblich dabei, verschiedene Instrumente oder menschliche Stimmen auseinander halten zu können. Ein Zusammenklang von mehreren Tönen wird dann als besonders harmonisch empfunden, wenn die Töne in einem ganzzahligen Verhältnis (beispielsweise 1:2) zueinander stehen [125]. Ein Ton, dessen Obertöne über den 6. bis 7. Teilton (harmonischer Oberton) hinausgehen und im Vergleich zum Grundton eher kräftig sind, wirkt scharf und rau. Ähnlich verhält es sich, wenn bei der akustischen Wandlung solche Anteile durch Nichtlinearitäten des Wandlers hinzukommen. In dieser Arbeit wurden stationäre Schwingungen bei unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden betrachtet.

¹dem ersten Anschwingen des Tones

Ausschwingvorgang Der Zeitabschnitt, in dem der Klang nach Ende seiner Anregung bis zur völligen Ruhe bzw. in den Geräuschteppich hinein ausklingt, wird Ausschwingvorgang genannt. Er beendet das Geräusch/den Klang (nach Meyer [80]) und hat eine besondere Bedeutung bei Zupf- und Schlaginstrumenten, da bei diesen wegen der fehlenden Dauererregung kein stationärer Zustand auftritt. Auch bei anderen Instrumenten hat er eine gewisse Bedeutung für die überzeugende Bindung zwischen den Tönen in fließenden Passagen eines Musikstückes. Generell ist er bestimmt durch die Restenergie, die im Resonanzsystem des Instrumentes gespeichert ist.

Grundsätzlich wird in der Literatur und in der gängigen Praxis eine Untersuchung des Amplituden- Frequenzgangs von Mikrofonen im (Hör-) Bereich zwischen 20 Hz und 20 kHz vorgenommen [136]. Allerdings scheint eine Untersuchung der Frequenzbereiche oberhalb von 20 kHz sinnvoll, da nach den Studien und Hörtests von u.a. Kimio Hamasaki [68] ein Teil der Probanden diese Frequenzen wahrnehmen konnten. Zusätzlich kommt dem “oberen Spektrum” bei der Transientenbetrachtung eine besondere Bedeutung zu. Je größer die Bandbreite ist, die das System übertragen kann, desto genauer erfolgt die Wandlung der transienten Anteile (die erste Schwingung) des Signals, die wiederum psychoakustisch maßgeblich auf den subjektiven Klang des Wandlers Einfluss nehmen [97, 102]. Außerdem wird v.a. in der Messtechnik zunehmend bei Wandlung und Kalibrierung der Bereich oberhalb von 20 kHz mit in Betracht gezogen. Auf diese neuen Erkenntnisse wurde bei der Versuchsplanung der vorliegenden Arbeit Rücksicht genommen und Messungen mit Anregungssignalen bis über 100 kHz durchgeführt.

2.2. Kondensatormikrofone

Mikrofone wandeln den Schall, also die Schwingung von Luftmolekülen um eine Gleichgewichtslage, indem die Membran dieser Schwingung folgt [125]. Das Prinzip der Kondensatoranordnung für die elektrostatische Wandlung gilt seit der Entdeckung als die beste Form der Wandlung von Schallwellen in elektrische Energie. Die beiden Platten eines Kondensators, bestehend aus der Membran und der Gegenelektrode werden zur Erzeugung des elektrostatischen Feldes mit einer elektrischen Gleichspannung versorgt. Die dünne und leichte Membran folgt den Bewegungen der Luftmoleküle, wodurch sich der Abstand zwischen den beiden Platten ändert. Diese Abstandsänderung bewirkt eine Kapazitätsänderung der Kondensator-Anordnung, die wiederum eine Spannungsänderung am Ausgang des Wandlers zur Folge hat [86, 121, 136].

Man unterscheidet zwischen Druck- (i.d.R. Messmikrofone) und Druckgradientenempfängern (Studiomikrofone). Näheres hierzu findet sich in den folgenden beiden Abschnitten.

Aus Gründen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten erfolgt bei Messmikrofonen die Ausführung beinahe der gesamten Kapselanordnung aus nur einem Werkstoff [130] (in der Regel Nickel oder Edelstahl). Außerdem sind alle Messmikrofone hinsichtlich ihrer geometrischen Form ähnlich konstruiert. Üblich sind 1", 1/2", 1/4" und 1/8" - Kapseln, alle rund und rotationssymmetrisch [1]. Die Schwingung von Messmikrofonen wurde untersucht, um die Grundlagen für ein optisches Kalibrierverfahren zu schaffen. Gleichzeitig soll durch die Messung an Studiomikrofonen ein Bezug zu den Ergebnissen der Hörtests hergestellt werden.

Im Bereich der Studiomikrofone haben sich in den vergangenen Jahrzehnten unterschiedliche Membranmaterialien durchgesetzt (siehe Tabelle 3.1 in Kapitel 3). So besteht die Membran üblicherweise aus einer gespannten Kunststoffolie², die mit einer elektrisch leitfähigen, homogenen Oberfläche (aus Gründen der Verarbeitbarkeit und der Korrosionsfestigkeit i.d.R. Gold) bedampft ist. Diese ist in kleinem Abstand über einer Gegenelektrode aufgehängt. Dazwischen befindet sich ein Luftpolster. Dieses (und das zusätzlich angekoppelte Volumen hinter der Elektrode) wirkt wie ein Masse-Feder-System [99]. In der Gegenelektrode sind Löcher und Sackbohrungen vorhanden, um die Schwin-



Abbildung 2.3.: Kondensatormikrofone (Gradientenempfänger), U87 (links), C414 (Mitte), M930 (rechts)

²Metallmembranen sind auch bei Studiomikrofonen möglich, jedoch nicht gebräuchlich

gung gezielt zu beeinflussen. So wirkt das Luftpolster im Bereich der Resonanzfrequenz der Kapselkonstruktion (bei Druckgradientenempfängern) dämpfend und gewährleistet einen ausgeglichenen Frequenzgang [73].

Verzerrungen treten bei Mikrofonen lediglich bei hohen Schallpegeln auf. In aller Regel stammen die gemessenen Verzerrungen aus den verwendeten Verstärkern. Verzerrungen, die sich aus der mechanischen Schwingung der Membran ergeben, konnten bei der vorliegenden Arbeit und den gezeigten Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Alle untersuchten Membranen arbeiteten bis zu einem Pegel von $4 V_{pp}$ absolut linear, das entspricht einem Schalldruck von ca. 143 dB³.

Bei Kondensatormikrofonen ist die Membranauslenkung schalldruckproportional. Der lineare Bereich setzt Auslenkungen voraus, die deutlich kleiner als der Membranabstand sind. Eine einfache Größe, mit der die Linearität abgeschätzt werden kann, ist die relative Signalspannung, die der relativen Auslenkung entspricht. Solange die elektrische Vorspannung wenigstens eine Dekade größer als die Signalspannung ist, kann mit Klirrfaktoren unter etwa 10% gerechnet werden. Im Allgemeinen steigt mit abnehmendem Membrandurchmesser die Aussteuerungsgrenze. Mit kleinen Messmikrofonen⁴ können zum Teil Pegel bis über 180 dB verzerrungsfrei gemessen werden. Die Aussteuerungsgrenze von Studiomikrofonen liegt in der Regel deutlich darunter [85, 136].

³bei 1" Messmikrofonen mit einer Empfindlichkeit von $50 \frac{mV}{Pa}$

⁴v.a. $\frac{1}{4}$ " oder $\frac{1}{8}$ "-Kapseln

2.2.1. Druckempfänger

Seit den 50er Jahren werden Kondensatormikrofone als Präzisionsmessgeräte zur Messung von Luftschall verwendet [1]. Druckempfänger gelten als das Mittel der Wahl bei der Messung von Schallereignissen. Der Aufbau ist zu sehen in Abbildung 2.4. Die Kapsel eines Druckempfängers ist nach hinten durch eine Glasscheibe luftdicht abgeschlossen und wird vorne von der Membran begrenzt.

Schallereignisse stellen Luftdruckschwankungen dar, die gegenüber dem statischen Luftdruck in der Kapsel die Membran in Schwingung versetzen. Druckempfänger arbeiten prinzipbedingt ausschließlich in der Richtcharakteristik Kugel. Das bedeutet, dass sie den Schall aus allen Richtungen gleichmäßig aufnehmen. Lediglich der Mikrofönkörper führt v.a. bei hohen Frequenzen zu einer leichten Einschränkung der Kugelcharakteristik. Bei Wellenlängen, die im Bereich der physikalischen Kapselgröße liegen oder kleiner sind, ändert zusätzlich noch der Staudruck vor der Membran, bzw. der Schallschatten der Kapselrückseite die richtungsabhängige Empfindlichkeit und das Frequenzverhalten des Mikrofons [132]. Eine Kapillare gewährleistet den Druckausgleich der Kapselanordnung bei Luftdruckschwankungen (bspw. durch Höhen- und Wetteränderungen). Die Membran von Druckempfängern ist mechanisch vorgespannt.

Für die Untersuchungen an Messmikrofonen wurden von der Firma Microtech Gefell verschiedene Prüflinge zur Verfügung gestellt, die sich in der mechanischen Vorspannung der Membran, deren Dicke ($2\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$) und im Material (Nickel, bzw. Edelstahl) unterscheiden. Die Messergebnisse der neun Prüflinge (alles $1/2''$ Messmikrofonkapseln MK221) lassen sich damit direkt miteinander vergleichen und mittels Ermittlung der Übertragungsfunktionen (siehe Abschnitt 4.5.2) die Auswirkungen der Parameteränderung direkt aus den Ergebnissen ablesen, da pro Kapsel jeweils nur ein Konstruktionsparameter geändert wurde. Eine Übersicht der Kapseln findet sich in den Tabellen 4.2 und 4.3 in Abschnitt 4.4. Darüber hinaus wurden $1''$, $1/2''$ und $1/4''$ -Messmikrofone in verschiedener Hinsicht bezüglich der Membranschwingung und deren Amplitude untersucht.

Im Gegensatz zu Druckgradientenempfängern entsteht bei Druckempfängern durch das Funktionsprinzip der Kapsel kein sogenannter Nahbesprechungseffekt. Druckempfänger sind hoch abgestimmte Systeme, d.h. die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des Mess-, bzw. Hörbereiches (z.B. MK221 $f_{res} = 27\text{ kHz}$). Die Membran ist mechanisch so stark vorgespannt, dass sie sich selbst in Position hält. Eine Veränderung der mechanischen Vorspannung führt zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz. Generell gilt: Je größer die mechanische Spannung, desto höher ist die Resonanzfrequenz. Umgekehrt verhält es sich mit der akustischen Empfindlichkeit: je geringer die Vorspannung, desto empfindlicher ist das Mikrofon gegenüber Schallereignissen bzw. Luftdruckschwankungen. Die

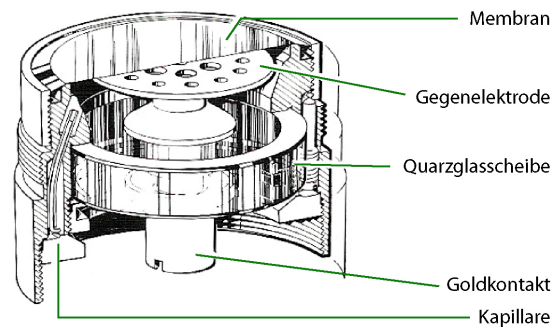


Abbildung 2.4.: Druckempfänger, Kapsel-Aufbau nach [1]

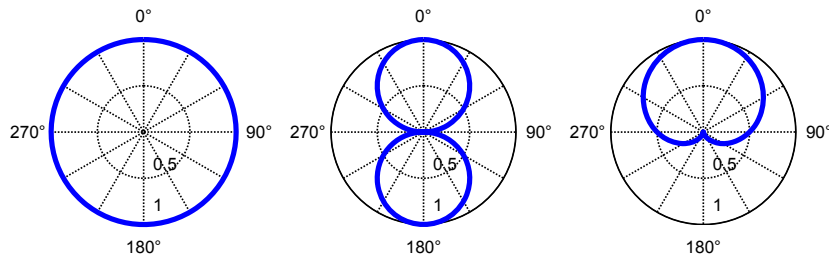


Abbildung 2.5.: schematische Darstellung der grundlegenden Richtcharakteristiken: Kugel (links), Acht (Mitte), Niere (rechts) [25]

untere Grenzfrequenz des Kapselsystems eines Druckempfängers ist u.a. abhängig von der Größe der genannten Kapillare zum Luftdruckausgleich. Messungen im Infraschallbereich sind durchaus üblich und realisierbar. Die Polarisationsspannung der Kapseln ist mit 200 V relativ hoch [1, 19, 37, 38, 111, 123, 130, 136].

2.2.2. Druckgradientenempfänger

Im Studiobereich haben sich vor allem Druckgradientenempfänger etabliert. Bei diesen Mikrofonen sind die erzeugten elektrischen Signale mit dem Druckgradienten proportional. Sie bieten im Vergleich zu Druckempfängern den Vorteil von unterschiedlichen Richtcharakteristiken. Die gebräuchlichsten sind Kugel, Niere und Acht (zu sehen in Abbildung 2.5).

Die Mikrofonkapsel ist hierbei entweder als Ein- oder als Doppelmembransystem ausgelegt. Eine Übersicht über die möglichen Kapselanordnungen findet sich in Abbildung 2.6. Bei den Einmembransystemen (in der Abbildung oben) ist die Rückseite der Kapsel - zumindest teilweise - schalldurchlässig gestaltet, bzw. mit einem akustischen Laufzeitglied versehen. Somit ist die Membran für den Schall von allen Seiten zugänglich. Ist die Rückseite komplett schalldurchlässig, hat die Kapsel eine sogenannte Acht-Charakteristik. Durch Einbringen eines akustischen Laufzeitgliedes an der Kapselrückseite erhält man alle möglichen Zwischenformen bis hin zu einer nierenförmigen Richtcharakteristik.

Bei Doppelmembranmikrofonen kann durch Verschaltung von zwei "Nieren" auch eine Kugelcharakteristik (wie bei Druckempfängern) realisiert werden (siehe Abbildung 2.6, unten). Doppelmembransysteme verfügen i.d.R. über eine umschaltbare Richtcharakteristik. Dies wird realisiert über eine einstellbare Polarisationsspannung an den beiden Membranflächen. Wird nur eine der beiden Membranen mit einer Polarisationsspannung versorgt, arbeitet das Mikrofon in Nierencharakteristik in Richtung der polarisierten Membran. Versorgt man beide Membranen mit der gleichen Polarisationsspannung, erhält man eine Kugelcharakteristik. Wenn eine der beiden Membranen mit einer gegenpoligen Spannung gespeist wird, arbeitet die Kapsel in Acht-Charakteristik (zu sehen in Abbildung 2.6, unten links). Durch die Verschaltung von zwei Nieren bei Doppelmembransystemen sind alle denkbaren Zwischenformen möglich (z.B. Superniere, breite Niere).

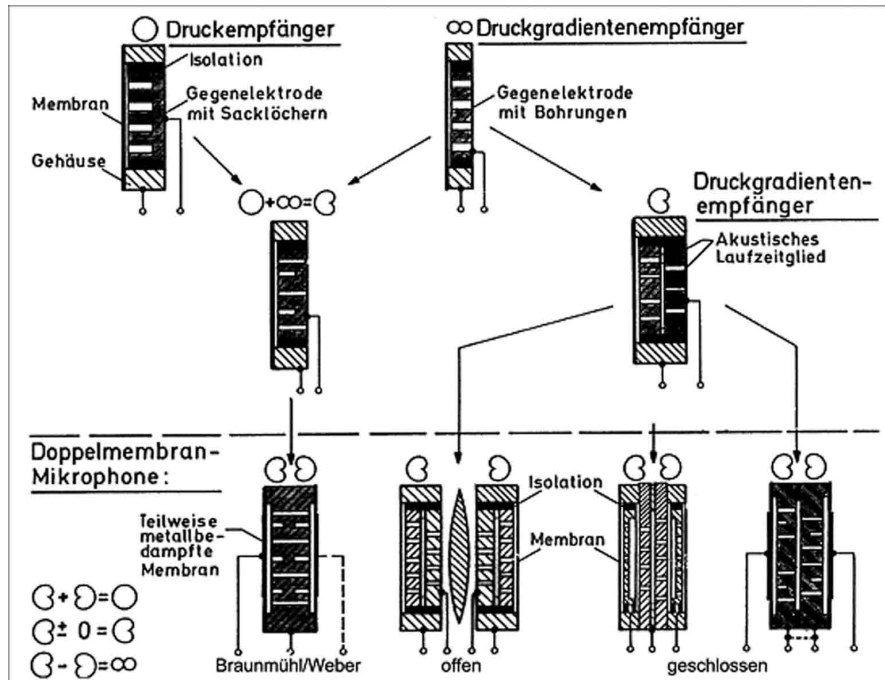


Abbildung 2.6.: Ein- und Doppelmembransysteme von Druck- und Druckgradientenempfängern und die resultierenden Richtcharakteristiken, nach [126]

Man unterscheidet zusätzlich zwischen Groß- und Kleinmembran-Mikrofonen [126].

Bei einem Druckgradientenmikrofon ist die schallaufnehmende Membran dem Schallfeld von beiden Seiten ausgesetzt. Der Schall erreicht auch die Rückseite der Membran. Damit folgt diese nicht dem absoluten Schalldruck, wie es beim Druckempfänger der Fall ist. Sie folgt vielmehr dem Druckgradienten, also der aus dem akustischen Umweg zwischen Vorder- und Rückseite resultierenden Druckdifferenz. Diese Differenz ergibt sich, da der Schall um die Membran "herumwandern" muss, um sich auch auf der Rückseite auszuwirken.

Trifft ein Signal genau von der Seite orthogonal auf die Membran, so ergibt sich in der Folge keine Druckdifferenz und somit auch keine Membranbewegung. Bei Beschallung der Membranrückseite ist die Polarität des resultierenden Mikrofonsignals gedreht (spannungsinvertiert). Dies ist zu beobachten bei der Richtcharakteristik Acht [32, 48].

Bei der Kapselkonstruktion und -anordnung sind in der Praxis alle denkbaren Formen vorhanden und gebräuchlich.

Für die Untersuchungen lagen verschiedene Ausführungen von Kapseln vor, die sich in ihrer geometrischen Form (rund, rotationssymmetrisch, asymmetrische Mittenkontaktierung, dreieckig und rechteckig), der allgemeinen Bauform (v.a. Abstände zwischen Membran und Gegenelektrode), dem Membranmaterial (Nickel, goldbeschichtetes PVC, PE oder PET) unterscheiden. Eine Übersicht findet sich im Anhang A. Es wurden sowohl Ein- als auch Doppelmembransysteme betrachtet.

Druckgradientenempfänger sind - im Gegensatz zu Druckempfängern - luftsteif. Das bedeutet, dass die Membran durch das Luftpolster zwischen Membran und Gegenelektrode gehalten wird [83]. Gradientenempfänger weisen im Nahfeld eine erhöhte Empfindlichkeit für tiefe Frequenzen auf. Dies ist die Folge des Verlaufs von Gradient und Schnelle und macht sich durch den sogenannten "Nahbesprechungseffekt" bemerkbar.

Für Wellenlängen in der Größenordnung der Mikrofonabmessungen oder kleineren Wellenlängen stellt das Mikrofon ein akustisches Hindernis dar. Auftreffender Schall wird ganz oder teilweise reflektiert. Zusätzlich üben frontal eintreffende Schallwellen als Folge des Druckstaus eine um bis zu 6 dB größere Kraft auf die Membran aus. Seitlich oder rückwärtig eintreffende Schallwellen werden durch den Körper abgeschattet. Beide Effekte führen zu einer Erhöhung der Richtwirkung bei hohen Frequenzen [32]. Diese lässt sich aus den Polardiagrammen der jeweiligen Mikrofone ablesen (siehe Anhang A).

Gradientenempfänger sind tief abgestimmt. Das bedeutet, dass die Resonanzfrequenz (f_{res}) deutlich im hörbaren Bereich liegt (i.d.R. um $1,6\text{ kHz}$). Diese Resonanz wird durch das zwischen Membran und Gegenelektrode bestehende Luftpolster in Verbindung mit den Bohrungen und Sacklöchern (welches zusammen mit der Membran als Masse-Feder-System fungiert) in der Gegenelektrode bedämpft. Unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Schwingung der Membran nachgiebigkeitsdominiert und durch den Druck bestimmt, oberhalb der f_{res} ist sie jedoch massedominiert. Der Druckgradient stellt eine proportional zur Frequenz größer werdende Antriebskraft dar, die tiefe Abstimmung des Kapselsystems macht sich diesen Effekt zu Nutze, da bei einer hohen Abstimmung die Empfindlichkeit der Kapseln entsprechend zu hohen Frequenzen hin stark zunehmen würde. Die Membran soll im Übertragungsbereich lediglich eine frequenzunabhängig wirkende Reibungshemmung besitzen. Die Kapselresonanz wird durch die Luftreibung in den genannten Vertiefungen und Durchbohrungen der Gegenelektrode so bedämpft, dass sie sich nicht mehr auswirkt [32].

Schalldruck und -schnelle stehen immer in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Es besteht eine lineare Abhängigkeit. Trifft Schalldruck bzw. -schnelle auf der Membran auf, schwingt diese relativ linear im hörbaren Bereich. Bei der reziproken Schwingungsanregung kommt es allerdings durch die genannten Parameter zu Abweichungen. Es wirken Nichtlinearitäten wie bspw. durch die Löcher in der Gegenelektrode und das genannte Luftpolster. Das Lochmuster in der Gegenelektrode ist derart gestaltet, dass der Abstand der Bohrungen am Rand im Vergleich zur Mitte kleiner ist. Das bedeutet, dass die Luft am Rand besser zirkulieren kann und die Membran in der Bewegung weniger bedämpft wird. Dieser konstruktive Umstand bewirkt, dass die parabelförmige Auslenkung der Membran in ihrer Mitte zumindest zum Teil kompensiert wird [17, 18, 38, 99, 136, 48, 110, 132].

2.3. Reziprozitätsmethode

Die Reziprozitätsmethode wird seit den frühen 50er Jahren bis heute zur Kalibrierung von Messmikrofonkapseln angewandt [100, 111, 130]. Hierbei wird die Funktionsweise des Mikrophones “umgedreht”. Auf die Polarisationsspannung muss eine kleine Wechselspannung aufmoduliert werden. Das bedeutet, dass das Mikrofon gleichzeitig Schallquelle ist. Die Kapselanordnung wird somit “von innen heraus” zum Schwingen angeregt. Die Wechselspannung (zwischen 1 und 4 V_{pp}), die der Frequenzgenerator in beliebiger Signalforn bereitstellt, wird hierbei zwischen Membran und Gegenelektrode angelegt. Durch das wechselnde Feld bzw. die unterschiedliche Kraft, die auf die Membran wirkt, wird diese in eine Schwingung gebracht, die wiederum gemessen und abgetastet werden kann. Die Schwingungsantwort ist mit der Schalldruck-Amplitude des Luftdrucks weitestgehend linear und absolut stabil im Zeitverhalten.

Basierend auf Stuart Ballentines 1932 erschienenen umfangreichen mathematischen Beschreibung der physikalischen Grundlagen von bewährten akustischen Quellen - diese beinhalten das Thermophone, den elektrostatischen Wandler und das Pistophone - führte Richard K. Cook 1940 eine neue Methode zur Kalibrierung von Kondensatormikrofonen ein. Diese machte sich die physikalischen Eigenschaften der Mikrofone dahingehend zu Nutze, als dass der umgekehrte Vorgang der Schallwandlung dem elektroakustischen Übertragungsmodell folgt. In diesem Mechanismus sind sowohl die elektrische, als auch die mechanische Seite durch ein elektrostatisches Feld verbunden, in dem keinerlei magnetische Abhängigkeit besteht. Cook zeigte experimentell, dass ein Kondensatormikrofon dem Gaußschen Gesetz und somit der ersten der vier Maxwellschen Gleichungen folgt. Diese lässt Aussagen über den Fluss des elektrischen Feldes einer gegebenen Ladung durch eine geschlossene Fläche zu. Somit resultieren die elektrischen Ladungen der verschiedenen Frequenzen in akustischen (mechanischen) Bewegungen. Als Resultat bemerkte er, dass die einzigen mechanischen Größen zur Kalibrierung eines Wandlers die Lautstärke des Schalldruckpegel-Kopplers, der Druck des Gases im Koppler (= Luftdruck) und das Verhältnis der umgebenden thermischen Bedingungen sind. Gemessene elektrische Werte von Audiofrequenzen sind Spannungen. Diese wiederum rufen, sobald sie am Ausgang eines Kondensatormikrofons anliegen, adäquate veränderliche Kapazitäten der Kapsel des Mikrofons hervor. Die Membran schwingt analog zum Eingangssignal.

Mittlerweile hat sich dieses Vorgehen zur Kalibrierung hochwertiger Wandler zum vorherrschenden Standard in Deutschland, England, Kanada, Australien und Japan etabliert [1, 123, 130]. Auch in der vorliegenden Arbeit kommt diese Art der Schwingungsanregung zum Einsatz. Einige Einschränkungen sind jedoch hinzunehmen:

Durch die gleichmäßige Krafteinwirkung des schwankenden elektrostatischen Feldes auf die gesamte Membran können bspw. bei der Betrachtung von Störungen in der eigentlich homogenen Membranfläche keine Schwingungsmoden gezeigt werden, die nicht zirkular sind. (vgl. Abschnitt 2.4). Die Reziprozitäts-Methode ist eine gute Möglichkeit der Schwingungsanregung. Allerdings besteht im Vergleich zur Luftschallanregung eine Lücke, die nicht geschlossen werden kann. Immerhin ist diese Methode die beste verfügbare Näherung zur Realität.

2.4. Simulation von Schwingungen

Auf zirkular eingespannten Membranen sind bei Anregung verschiedene Schwingungsmoden zu erwarten. Diese sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Bei der Abbildung handelt es sich um eine Simulation der Schwingungen. Die Indizes m und n geben jeweils die Anzahl der Schwingungsbäuche an. Die Modenformen mit $m = 0$ werden als zirkulare Moden bezeichnet, bei $m \neq 0$ spricht man von radialen Moden. Auf die Darstellung von Moden höherer Ordnung oder solchen, die aus beiden der dargestellten Modenformen bestehen, wurde verzichtet, da diese für die vorliegenden Fälle der Membranschwingung nicht zutreffend sind. Die Eigenfrequenzen der Kreismembran ergeben sich aus den Nullstellen γ_{mn} der Besselfunktion J_m . Tabelle 2.1 zeigt diese für die ersten drei Ordnungen. Die Eigenfrequenzen für eine Membran mit Radius r errechnen sich mit:

$$f_{mn} = \frac{c\gamma_{mn}}{2\pi r} \quad (2.1)$$

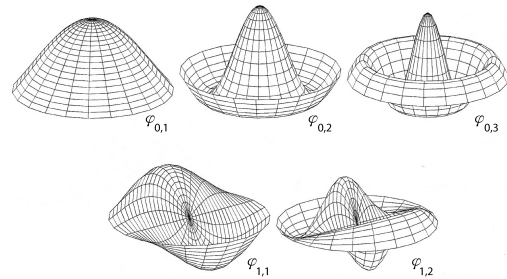


Abbildung 2.7.: einige mögliche Modenformen auf Kreismembranen, Simulation aus [85]

Nullstelle	n = 1	n = 2	n = 3
m = 0	2,405	5,520	8,654
m = 1	3,832	7,016	10,173
m = 2	1,635	2,679	6,699

Tabelle 2.1.: Nullstellen der Besselfunktion nullter, erster und zweiter Ordnung, nach [85]

Die Frequenz f_{01} ist die erste Resonanzfrequenz der Membran. Aus Tabelle 2.1 wird klar, dass die Frequenzverhältnisse zwischen Moden der ersten und denen höherer Ordnungen generell nicht harmonisch verlaufen. Somit beeinflussen sich die Moden nicht [42, 49, 85, 130].

Um einen Eindruck von einer schwingenden Fläche und den darauf entstehenden Moden zu bekommen, wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Diese ANSYS⁵-Simulationen haben ergeben, dass, wenn die homogene Fläche gestört wird - bspw. durch Einbringen eines "festeren" Bereiches auf der Membran (analog zum Trommelfell) - konzentrische Moden entfallen.

⁵Finite-Elemente-Software zur Lösung von strukturmechanischen Problemen

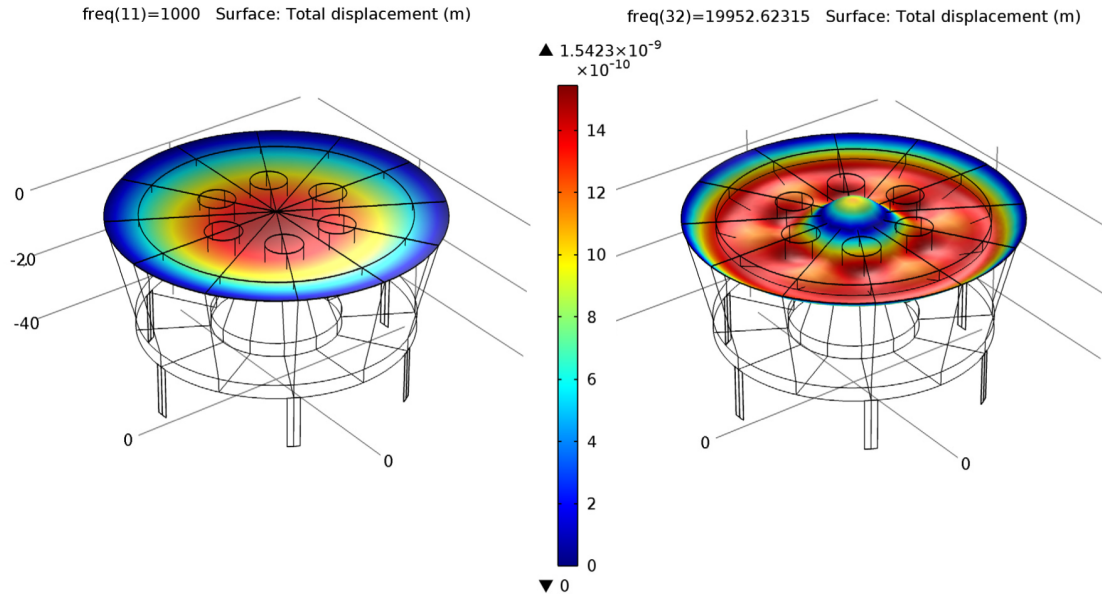


Abbildung 2.8.: COMSOL-Modell, Simulation der Schwingung einer 1/2"-Kapsel bei 1 kHz (links) und 20 kHz (rechts), nach [5]

Desweiteren wurden Teile eines Modells einer 1/2"-Messmikrofonkapsel⁶ in COMSOL-Multiphysics umgesetzt. So können diverse Parameter dieses Modells in einer FEM⁷-Simulation betrachtet werden [5, 26]. Die Membranschwingungen dieser Kapsel sind in Abbildung 2.8 bei zwei Frequenzen⁸ zu sehen. Außerdem ist es mit Hilfe dieses Modells möglich, die Ausbreitung des elektrostatischen Feldes zu simulieren. In Abbildung 2.9 wird gezeigt, dass im Bereich der Bohrungen in der Gegenelektrode das Feld kleiner ausfällt, als auf der restlichen Fläche. Diese Simulation ist die komplexeste und realitäts-treueste, die bislang umgesetzt wurde.

Darüber hinaus gibt es in der Literatur eine Reihe von modellhaften Untersuchungen des komplexen Systems Mikrofonmembran-Luftspalt-Gegenelektrode-Kapselsystem [10, 20, 55, 64, 98, 113].

Die Quellen simulieren in unterschiedlicher Komplexität das komplette System der Kapsel. Ranjbar [98] beispielsweise kommt zu dem Ergebnis, dass eine Vergrößerung des Luftspaltes hinter der Membran eine Verkleinerung des Drucks an der Gegenelektrode zur Folge hat, bei gleichzeitig stärkerer Verbiegung der Membran. Erhöht man die mechanische Spannung der Membran übermäßig, wird dadurch deren Elastizität drastisch eingeschränkt. Dieser Effekt wird bei Messmikrofonen bereits ausgenutzt, die in der Lage sein müssen, Schalldrücke weit jenseits der 140 dB verzerrungsfrei zu wandeln. Eine Erhöhung der Anzahl der Löcher in der Gegenelektrode ist die effektivste Methode, die

⁶Brüel&Kjaer 4134

⁷Finite-Elemente-Methode

⁸1 kHz und 20 kHz

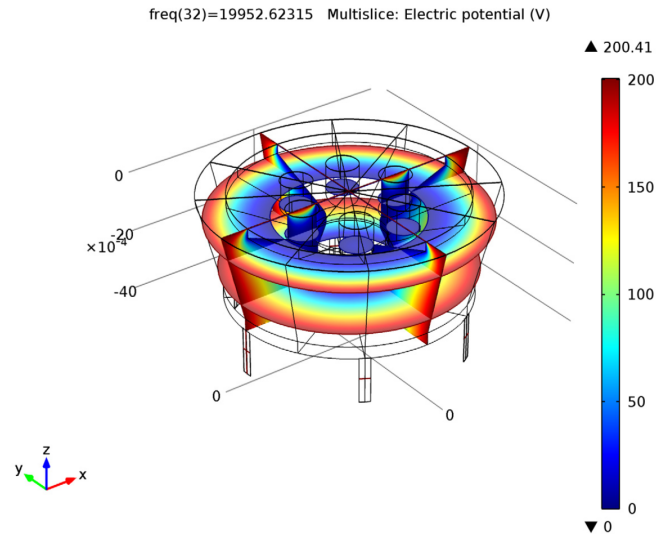


Abbildung 2.9.: COMSOL-Simulation, Ausbreitung des elektrostatischen Feldes bei einer 1/2"-Kapsel, nach [5]

Dämpfung der Schwingung zu reduzieren. Eine Vergrößerung der Lochradien in der Gegenelektrode um 20% resultiert in einer Absenkung des Druckes auf der Gegenelektrode um bis zu 50% [98].

Diese Untersuchungen beschäftigen sich allerdings weitestgehend mit physikalischen Eigenschaften, sind z.T. ausschließlich theoretische bzw. mathematische Betrachtungsweisen und nehmen keinerlei Bezug auf den Klang des Wandlers. Wie alle Simulationen bilden auch die genannten nur einen Teil der Realität ab. Entsprechend muss die Schwingung in der Praxis untersucht werden.

2.5. Messsystem

Die Ermittlung der objektiv bestimmbar Parameter und somit die Messung einer schwingenden Mikrofonmembran erfordert ein berührungsloses Messsystem, da die Masse eines punktuell aufgetragenen Sensors die Bewegung der nur wenige μm dicken und sehr leichten Membran stark beeinflussen würde. Aufgrund der hohen Genauigkeit wurde auf das Planspiegelinterferometer der Serie SP-S der Firma SIOS Meßtechnik GmbH zurückgegriffen (siehe Abbildung 2.10) [3].

Hierbei handelt es sich um ein klassi-



Abbildung 2.10.: Sensorkopf, Planspiegelinterferometer SP/S [3]

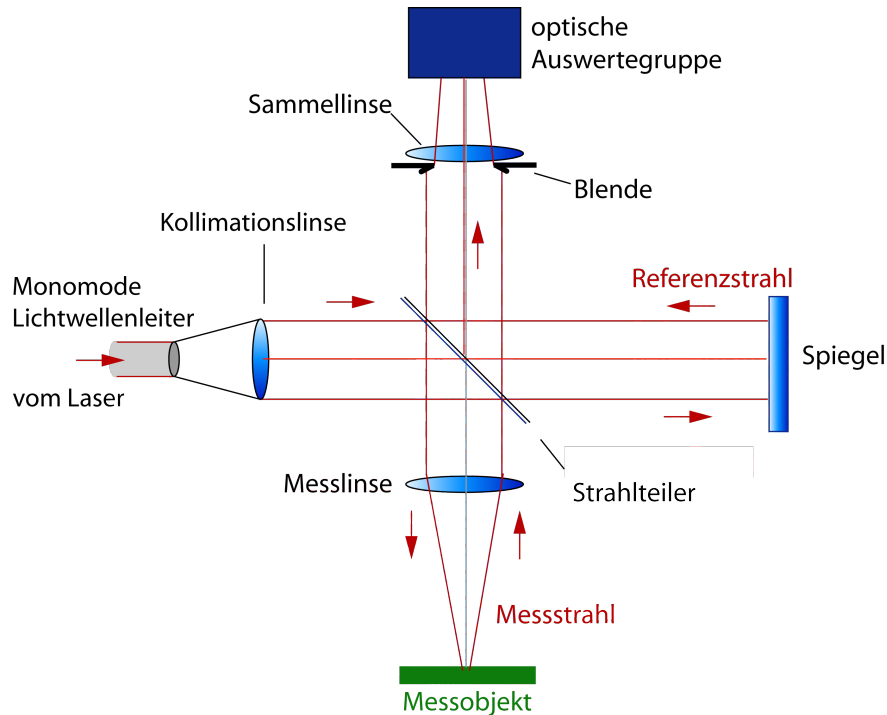


Abbildung 2.11.: schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers zur Abtastung optisch rauer Oberflächen, nach [36]

sches Homodyninterferometer⁹ nach dem Michelson-Prinzip (siehe Abbildung 2.11). Der He-Ne-Laser emittiert einen Strahl mit einer Wellenlänge von $632,8 \text{ nm}$ in absolut stabiler Frequenz, welcher mit einem Lichtwellenleiter übertragen und mittels der Kollimationslinse parallelgerichtet wird. Anschließend wird er mit Hilfe des Strahlteilers - einem halbdurchlässigen Spiegel - in zwei Teile gespalten. Die beiden Strahlen legen jeweils unterschiedlich lange Strecken zurück. Der Messstrahl wird am Messobjekt in sich selbst reflektiert und anschließend mit dem Referenzstrahl überlagert [35]. Verändert man die optische Weglänge des Messstrahls, bspw. durch die Abtastung einer schwingenden Fläche, verschieben sich die Phasen der beiden Wellen gegeneinander. Dadurch entsteht ein Interferenzmuster bei einer Überlagerung von Referenz- und Messstrahl. Durch die anschließende Analyse des zustandekommenden Musters können kleinste Veränderungen des Gangunterschiedes zwischen den beiden Wellen und somit die Schwingung gemessen werden [36]. Die Wegmessung durch Michelson-Interferometer zeichnet sich durch Linearität und eine hohe Auflösung aus. Mit diesem Messprinzip sind relative Bewegungen messbar, absolute Strecken können nicht bestimmt werden.

Das komplette System besteht aus einer modular aufgebauten Elektronikeinheit mit eingebautem HeNe-Laser, dem kompakten Sensorkopf und verschiedenen Schnittstel-

⁹nur eine definierte Frequenz des Lasers

len¹⁰. Der generelle Aufbau der Geräte basiert auf dem Konzept der Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor der Serie SP. Der Sensorkopf der Interferometer der Serie SP-S ist mit einer Zusatzoptik ausgestattet, die Messungen an Oberflächen beliebiger Rauigkeit ermöglicht.

Das lichtwellenleitergekoppelte Interferometer wandelt ein Messsignal in Richtung der optischen Achse in ein Interferenzsignal um. Dieses wird zu einer hochauflösenden, schnellen Demodulationselektronik übertragen und ausgewertet. Bedienung und Anzeige erfolgt über einen PC mit einer speziellen, von der Firma SIOS entwickelten und für die vorliegende Arbeit optimierten Software, die die Ergebnisse der Wegmessung im Zeitbereich und mit Hilfe einer FFT-Transformation ein Amplituden-Frequenz-Spektrum liefert. Das Interferometer stellt eine Abtastfrequenz bis zu 12,5 MHz zur Verfügung, der Messbereich des Gerätes reicht von 0 bis 3 MHz. Somit ist gewährleistet, dass die gewünschten Schwingungen auf Mikrofonmembranen adäquat und im Rahmen des Abtasttheorems gemessen werden können. Es wurden stationäre Schwingungen von 20 Hz bis 100 kHz untersucht und mit Abtastfrequenzen bis zu 500 kHz¹¹ gearbeitet. Umwelteinflüsse werden mit Hilfe der integrierten Sensoren ermittelt und ihr Einfluss auf die Wellenlänge des Laserlichtes bei der Auswertung korrigiert. Der externe Trigger-Eingang erlaubt die Steuerung der Einzelmessungen. Das Messsystem wird mittels USB an den Rechner angeschlossen und eingestellt bzw. bedient [3].

Mit Hilfe der Software "Infas Vibro" ist eine automatisierte Messung mittels eines Scripting-Tools möglich. Diese erlaubt die Integration von zusätzlichen Komponenten in den Messablauf (siehe Kapitel 4.1). So wurden - je nach geometrischer Form und Zugänglichkeit der Membranfläche - die Kapseln sowohl punktuell untersucht, als auch in einem geeigneten Raster flächig gescannt. Im Verlauf der Arbeit konnten Schwingungen der Membranen in einem Bereich von 1 μm ($10^{-6} m$) bis zu 3 μm ($10^{-12} m$) gemessen und die resultierenden Schwingungen visualisiert werden (siehe Kapitel 4).

¹⁰USB, RS 232C, analog

¹¹bei der Abtastung von impulshaften Signalen

3. Hörtests

3.1. Aufbau

Um Aussagen zum Klang unterschiedlicher Kapselkonstruktionen und Membranmaterialien treffen zu können, wurde ein Hörtest entwickelt [25]. Dieser soll es erlauben, subjektive Klangeindrücke anhand einer Skala zu quantifizieren und mit den objektiv gemessenen Ergebnissen in Bezug zu bringen. Für diesen Test musste eine Auswahl an verschiedenen Mikrofontypen getroffen werden. Man beschränkte sich auf Druckgradientenempfänger mit nierenförmiger Richtcharakteristik. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass zwischen Druck- und Druckgradientenempfängern eklatante klangliche Unterschiede liegen. Dies lässt sich zum Einen auf die Richtcharakteristik (Kugel im Vergleich zu Niere) zurückführen, zum Anderen scheint die in Messmikrofonen verwendete Nickelmembran erheblichen Einfluss auf den Klang zu haben. Dies wird später noch im Einzelnen gezeigt. Damit hätten Messmikrofone die Bewertungskriterien der klanglich ohnehin sehr eng beieinander liegenden Gradientenempfänger zu stark beeinflusst.

Bei der Auswahl wurde Wert darauf gelegt, dass den Expertenhörern bekannte Mikrofontypen ebenso berücksichtigt wurden, wie komplett neuartige oder andersförmige Konstruktionen. Zusätzlich zu den am Markt frei erhältlichen Mikrofonen wurden von der Firma Microtech Gefell speziell entwickelte Kapselkonstruktionen in den Test integriert, die sich teilweise in nur einem Parameter unterscheiden. Zusätzlich kamen Mikrofone der Firmen Neumann, AKG und Microtech Gefell in die Auswahl. Die Firmen Pearl und Ehrlund fertigen Kapseln, die andere geometrische Formen aufweisen, als die übliche Kreisform. Somit konnten auch Rechteck- und Dreiecksmembranen untersucht werden. Insgesamt wurden 12 unterschiedliche Mikrofone betrachtet und bewertet (siehe Tabelle 3.1). Diese lassen sich hinsichtlich der Membran in Form, Größe und Material einteilen, unterscheiden sich in der Mittenkontaktierung (symmetrisch und asymmetrisch), sowie in der Art der Kapselkonstruktion in Ein- und Doppelmembransysteme. Eine Übersicht über alle untersuchten Mikrofone, Abbildungen, Amplituden- Frequenzgänge sowie die individuellen technischen Parameter findet sich im Anhang A.

Bezeichnung Hersteller	Membranparameter				Kapsel System
	Form	Größe	Material	Kontakt	
Dreieck Ehrlund	Dreieck	26 x 26 x 26 mm Seitenlänge	Aluminium k.A.	Rand	EMS
ELM-C, Pearl	Rechteck	10 x 7 0mm Seitenlänge	k.A. k.A.	Rand	DMS
KM184 Neumann	Kreis	$\varnothing_a = 19,7$ mm $\varnothing_i = 16$ mm	PES, gb k.A.	Rand	EMS
M300 MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 18$ mm $\varnothing_i = 14$ mm	PET, gb k.A.	Rand	EMS
M70 Ni, MTG MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 16$ mm $\varnothing_i = 13$ mm	Nickel 0,8 μ m	Rand	EMS
M70 PET MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 16$ mm $\varnothing_i = 13$ mm	PET, gb 1,9 μ m	Rand	EMS
M71 PET Sym MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 29,8$ mm $\varnothing_i = 27,5$ mm	PET, gb 6 μ m	Mitte sym	DMS
M71 PET Asym MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 29,8$ mm $\varnothing_i = 27,5$ mm	PET, gb 6 μ m	asym	DMS
M71 PVC Sym MTGefell	Kreis	$\varnothing_a = 29,8$ mm $\varnothing_i = 27,5$ mm	PVC, gb 6-8 μ m	Mitte sym	DMS
C414B-ULS AKG	Kreis	$\varnothing_a = 25$ mm k.A.	k.A. k.A.	Rand	DMS
U87 Ai Neumann	Kreis	$\varnothing_a = 34$ mm $\varnothing_i = 29,7$ mm	PES, gb k.A.	Mitte sym	DMS
M930, MTG	Kreis	$\varnothing_a = 29,8$ mm $\varnothing_i = 27,5$ mm	PET, gb 6 μ m	Mitte sym	EMS

Tabelle 3.1.: Im Hörtest untersuchte Mikrofone

PES = Polyester, PET = Polyethylenterephthalat, PVC = Polyvinylchlorid; gb = goldbedampft; EMS = Einmembransystem, DMS = Doppelmembransystem

Bezeichnung	Signaltyp	Titel	Produktion	Länge
Eddi	SEK, AHKT SZK, GHKT	Eddi Rabbitt: Early in the morning	SQAM CD	0:16 Min
Hancock	SZK AHKT	Herbie Hancock: Cantaloup Island	Bösendorfer	0:42 Min
Speech	SEK AHKT	englische Sprache männlicher Sprecher	SQAM CD	0:22 Min
Stravinsky	SEK AHKT	Stravinsky: Le Sacre du Printemps	SQAM CD	0:14 Min

Tabelle 3.2.: Ausgewählte Klangbeispiele für den Hörtest

SEK = Schallquellen der ersten Klasse, SZK = Schallquellen der zweiten Klasse

AHKT = angenähert harmonisch komplexe Töne, GHKT = gering harmonisch komplexe Töne

Hörbeispiele Die in Tabelle 3.2 gezeigten Klangbeispiele wurden in einem qualitativen Pre-Test mit drei Probanden aus vielen möglichen Signalen ausgewählt und als für den Hörtest sinnvoll erachtet. Es sollten möglichst unterschiedliche Hörbeispiele gefunden werden, die in der Praxis gängige Signale berücksichtigen. Tabelle 3.2 zeigt die Einordnung der jeweiligen Signaltypen nach Schallquellen der ersten und zweiten Klasse (nach Terhardt [116]) sowie nach angenähert harmonisch komplexen Töne (AHKT) und gering harmonisch komplexen Töne (GHKT).

Das Klangbeispiel “Eddi” (Pop Musik) enthält sowohl Gesangs-, als auch Schlagzeug- und Gitarrensignale und kann somit allen vier Gruppen zugeordnet werden. Da bei “Stravinsky” (klassisches Blasorchester) Blasinstrumente und beim Klangbeispiel “Sprache” (Speech) Geräuschanteile enthalten sind, werden diese zu den AHKT gezählt. Das Klangbeispiel “Hancock” (Jazz) wurde mit dem Bösendorfer Flügel aufgenommen und ist damit zu den SZK, sowie den AHKT zu zählen [25].

Kriterien der Auswahl waren die grundsätzliche Wahrnehmung von Klangunterschieden, die Größe dieser Unterschiede und die Möglichkeit zur brauchbaren Beurteilung der Unterscheidung. Einzeltöne eines Flügels oder einzelne Schlaginstrumente lassen zwar eine gute Abgrenzung der verschiedenen Kapselkonstruktionen zu, sind jedoch vor allem aufgrund der Kürze des Impulses und der Fülle der Mikrofon-Prüflinge äußerst schwierig zu beurteilen.

Die unterschiedlichen gewählten Klangbeispiele wurden mit den genannten Mikrofonen aufgezeichnet. Hierzu wurden Signale mit Hilfe eines Coaxial-Lautsprechers¹ wiedergegeben. Die Membranmitte der Kapseln wurde in einer Achse (0°) im Abstand von 1 m vor dem Lautsprecher ausgerichtet, das Signal aufgezeichnet (siehe Abbildung “Mikrofon-Ausrichtung” im Anhang A.26). Hierbei wurde - soweit möglich - lediglich ein Mikrofonverstärker aus dem Hause Microtech Gefell verwendet, die unterschiedlichen Kapseln zur Aufnahme jeweils aufgeschraubt. Somit ist der Einfluss dieses Bauteiles auf den Klang - zumindest bei einigen der Prüflinge - ausgeschlossen. Bei der klanglichen Beurteilung

¹ME Geithain RL901k

kommen lediglich die konstruktiven Unterschiede der Kapsel zum Ausdruck. Die verschiedenen Mikrofone wurden anschließend in der gleichen Kette (siehe Abbildung 3.1) auf demselben Kanal eines A/D-Wandlers² mit Hilfe einer Audio-Workstation gespeichert.

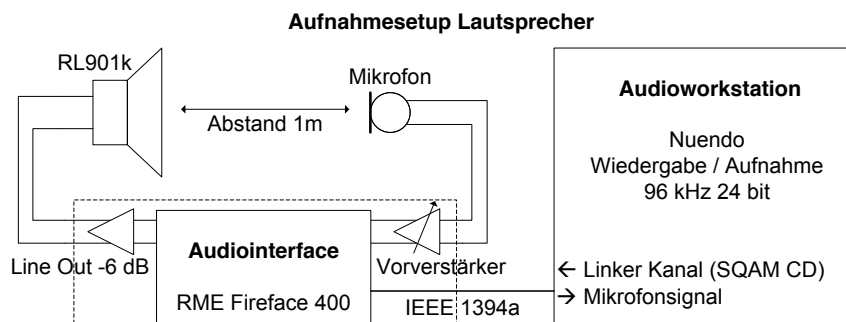


Abbildung 3.1.: Aufnahme-Setup Lautsprecher, Blockschaltbild

Zusätzlich wurde nach einem natürlichen Signal gesucht, das reproduzierbar ist. Da es für einen Musiker nicht möglich ist, mehrmals hintereinander identische Stücke zu spielen, kam eine Alternative zum Einsatz. Die Firma Bösendorfer hat einen Konzertflügel mit einem CEUS Reproduktionssystem ausgestattet. Dieses System speichert das einmal eingespielte Musikstück und kann es per Tastendruck über ein automatisiertes Anschlagssystem wiedergeben. Bei diesem System sind Schwankungen in der Wiedergabe des Musikstückes stark minimiert; Anschlagsstärke, zeitliche Komponenten und Dynamik bleiben gleich, die Saiten des Flügels schwingen bei den jeweilig angeschlagenen Tönen in der gleichen Art und Weise. Jede Wiedergabe ist identisch. Somit können alle Prüflinge zeitlich hintereinander an dem selben Punkt platziert und die Wiedergabe reproduzierbar aufgezeichnet werden. Das Aufnahmesetup findet sich als Blockschaltbild in Abbildung 3.2 sowie als Foto Anhang, Abbildung A.25.

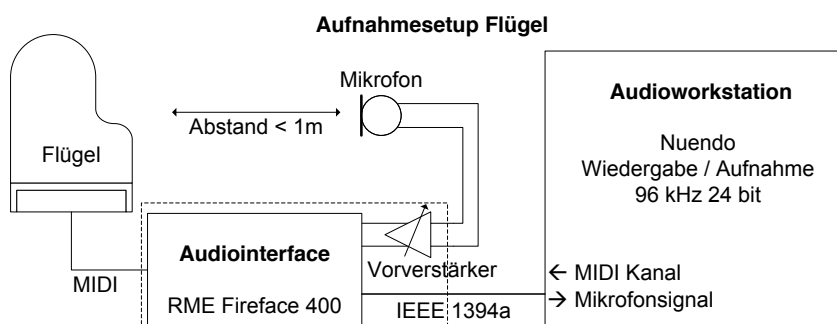


Abbildung 3.2.: Aufnahme-Setup Flügel, Blockschaltbild

²RME Fireface 400

Gewinnung der Attribute Zur Gewinnung der Attribute für den Hörtest wurde eine RGT³ mit Paarvergleich durchgeführt. Es nahmen insgesamt fünf Probanden am Test teil. Zur Beurteilung wurden sechs verschiedene Mikrofone ausgewählt:

- Ehrlund Dreieckskapsel
- Pearl ELMC (rechteckförmige Membran)
- Neumann KM184 (Kleinmembran)
- Microtech Gefell M70 (Kleinmembran), Material: Nickel
- MTG M71 (Großmembran), Material: PET, symmetrische Mittenkontaktierung
- Neumann U87 (Großmembran)

Bei der Auswahl der Mikrofone zur Erhebung der Attribute sollten möglichst deutlich hörbare Klangunterschiede und alle Membranformen sowie möglichst alle zur Verfügung stehenden Membranmaterialien vertreten sein. Außerdem wurden alle vier o.g. Klangbeispiele verwendet, um eine im Vorfeld vermutete Abhängigkeit der individuellen Klangunterschiede vom jeweiligen Beispiel auszuschließen. Daraus ergaben sich insgesamt 24 Stimuli und ein AB Vergleich von 60 Paaren. Von den Probanden sollte der Unterschied zwischen jeweils zwei Stimuli in einem Wort beschrieben werden. Zusätzlich musste das gegenteilige Wort genannt werden. Anschließend wurden anhand aller genannten Wortpaare die Klangbeispiele gegeneinander bewertet.

Für diesen AB-Test kam die Oberfläche der STEP-Software⁴ von Audio Research Labs zum Einsatz (siehe Abbildung A.27 im Anhang). Der Test wurde als Blindtest durchgeführt. Das bedeutet, dass der Proband auf der Bedienoberfläche keine Hinweise erhält, um welches Mikrofon es sich beim jeweiligen Prüfling handelt, er wählt lediglich zwischen 14 Buchstaben (A-N). Die Reihenfolge der Prüflinge bei den unterschiedlichen Hörbeispielen war dynamisch. Dem Versuchsleiter hingegen war im Verlauf des Tests bekannt, welches Mikrofon dem jeweiligen Stimulus zugeordnet war, um für die spätere Auswertung die jeweiligen Konstrukte auch einem Wandler zuordnen zu können.

Um ähnliche Konstrukte zusammenzufassen, wurde für die Auswertung der RGT pro Proband (intrasubjektiv) eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Als Ähnlichkeitsmaß diente der Korrelationskoeffizient nach *Pearson* und zur Clusterbildung das *Average Linkage* Verfahren. Letztendlich wurden die folgenden Attribute zur Bewertung der Klangeigenschaften der untersuchten Mikrofone extrahiert und kamen später im Hörtest zur Anwendung:

- Attribut *Nähe* (Skalenendpunkte: fern/nah, Erläuterung: nicht präsent/präsent, dünn/voll)

³Repertory Grid-Technik

⁴Subjective Training and Evaluation Program

- Attribut *Natürlichkeit* (Skalenendpunkte: verfärbt/natürlich, Erläuterung: metallisch/natürlich, synthetisch/natürlich, hohl/ausgewogen)
- Attribut *Transparenz* (Skalenendpunkte: verwaschen/transparent, Erläuterung: gestört/klar, matschig/klar)
- Attribut *Bass/Höhen-Balance* (Skalenendpunkte: basslastig/höhenlastig, Erläuterung: dumpf/scharf, stumpf/spitz, dunkel/hell, warm/kalt)
- Attribut *Allgemeines Ranking* (Skalenendpunkte: schlecht/ausgezeichnet)

Die Attribute *Nähe*, *Natürlichkeit* und *Transparenz* ergaben sich direkt aus den Clustern der Probanden (die dazugehörigen Dendrogramme⁵ finden sich in Anhang B.1). Das Attribut *Bass/Höhen-Balance* wurde hinzugenommen, um später die Unterschiede der spektralen Verteilung in Abhängigkeit zu den anderen Attributen interpretieren zu können. Um die allgemeine subjektive Einschätzung der Mikrofone zu erheben, kam noch ein fünftes Attribut zur Anwendung; das Attribut *Allgemeines Ranking*. Es sollte zur Interpretation der anderen Attribute dienen, um eine Gewichtung der einzelnen Klangeigenschaften zur subjektiven Gesamtbeurteilung herzustellen.

Hörtests Für die Durchführung der Hörtests kam ein modifizierter MUSHRA⁶-Test (Multi Stimulus with hidden Reference and Anchor) zum Einsatz. Der MUSHRA-Test wurde im Jahr 2003 für die Bewertung der “Basic Audio Quality” von Audiocodern entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine doppel-blind, multi-stimulus Methode. Insgesamt können 15 Signale⁷ miteinander verglichen und anhand einer Skala von 0 bis 100 mit einer Schrittweite von 1 gegeneinander bewertet werden. Der MUSHRA - Test musste jedoch für die Untersuchung von Mikrofon-Kapseln leicht verändert und angepasst werden. Auf die Referenz wurde verzichtet, da kein subjektives “Referenzmikrofon” gewählt werden sollte, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt hätte. Auch wurde keines der Anregungs-/Tonsignale als Referenz herangezogen, da hier der Einfluss von Lautsprecher und Raum im Vergleich zu den aufgenommenen Testsignalen nicht enthalten ist, was wiederum zu starker Verwirrung der Probanden und letztendlich zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt hätte. Ein Messmikrofon war hierfür ebenfalls nicht geeignet, da allein die abweichende “Kugel” - Charakteristik einen zu massiven Klangunterschied zu den anderen Prüflingen ergeben hätte.

Als Referenz muss ein Signal mit hoher Qualität benutzt werden, zu dem die untersuchten Systeme erkennbare Unterschiede aufweisen. Das Referenzsignal wird zusätzlich als versteckte Referenz, die sogenannte “hidden reference” (HR), benutzt. Um dem Probanden einen bekannten Qualitätslevel zu präsentieren, wird als versteckter Anker ein tiefpassgefiltertes Referenzsignal verwendet. Im vorliegenden Fall wurde das Signal des M930 sowohl als Referenz als auch als versteckte Referenz gewählt. Dieses war somit doppelt im Test vorhanden und dient der Einordnung der Ergebnisse aus den Hörtests.

⁵Baumdiagramme

⁶nach ITU-R BS.1534-1

⁷12 Systeme + 1 Referenz + 1 versteckte Referenz + 1 Anker

Als Anker kam das gleiche Signal zum Einsatz - jedoch mit einem Tiefpassfilter⁸ und einer Flanke von 12 dB/Oktave belegt (in den folgenden Darstellungen der Ergebnisse als M930 LP bezeichnet). Anker und versteckte Referenz kamen zu den 12 Signalen der unterschiedlichen Kapseln hinzu. Somit ergab sich ein paralleler Vergleich von 14 Stimuli. Jedes der vier Klangbeispiele wurde mit den fünf evaluierten Attributen bewertet. Jeder Proband musste damit insgesamt 280 Bewertungen abgeben. Der gesamte Hörtest wurde als doppel-blind Test (weder Proband, noch Testleiter wissen hierbei, welcher Prüfling sich hinter dem jeweiligen Buchstaben der STEP-Software verbirgt, damit nicht unbewusst Einfluss auf die subjektive Bewertung genommen werden konnte) mit dem in Abbildung 3.3 gezeigten Wiedergabe-Setup mittels Stax Lambda-Basic⁹-Kopfhörern durchgeführt. Es kam die genannte MUSHRA GUI¹⁰ von STEP zum Einsatz. Hierbei wurden den fünf ermittelten Klang-Attributen die jeweiligen Skalenendpunkte zugeordnet.

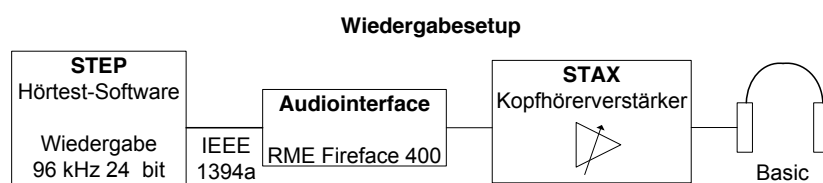


Abbildung 3.3.: Wiedergabe-Setup

Für die Hörtests wurde eine Gruppe aus 16 Expertenhörern (7 Tonmeister und Toningenieure, 3 Studenten der Musikproduktion und 6 wissenschaftliche Mitarbeiter mit Hörtesterfahrung im Audiobereich) gewählt, die alle fast täglich intensiven Umgang mit unterschiedlichen Mikrofonen haben, damit vertraut sind und letztlich die feinen Unterschiede zwischen den Prüflingen unterscheiden können.

Datenanalyse Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit einer ANOVA¹¹ Varianzanalyse und dem Statistik Programm SPSS 19¹². Voraussetzung zur Durchführung einer ANOVA ist die Normalverteilung der intervallskalierten abhängigen Variable, Varianzhomogenität und die Unabhängigkeit der Beobachtungen. Allerdings ist die ANOVA robust gegenüber Voraussetzungsverletzungen, vor allem, wenn die Stichproben gleich groß sind. Dies war bei der vorliegenden Untersuchung der Fall. Die Varianzhomogenität wird mit Hilfe des *Levene-Tests*¹³ überprüft, der die Fehlervarianzen der Gruppen auf Gleichheit testet. Bei einer Verletzung dieser Voraussetzung kann ein sogenannter *F_{max}-Test* durchgeführt werden, der die größte und kleinste Gruppenvarianz ins Verhält-

⁸10 kHz, Low-Pass

⁹System aus Basic SR202 und SRM212

¹⁰Graphical User Interface

¹¹von englisch: *analysis of variance*

¹²Statistical Package for the Social Sciences

¹³ein Signifikanztest in der Statistik

Attribut	F	df1	df2	Signifikanz
Nähe	1,809	13	882	0,038
Natürlichkeit	5,306	13	882	0,000
Transparenz	4,390	13	882	0,000
Bass/Höhen-Balance	1,834	13	882	0,034

Design: Konstanter Term + Mic

Tabelle 3.3.: Levene-Tests der Attribute über alle Klangbeispiele

nis setzt. Ist der F_{max} -Wert größer als 10, ist die tatsächliche α -Fehlerwahrscheinlichkeit größer als die nominelle α -Fehlerwahrscheinlichkeit und eine Änderung des α -Fehlers auf 0,025 vorzunehmen [22].

Das α -Niveau aller Signifikanztests beträgt 0,05 und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit im weiteren Text nicht mehr angegeben. Eine Ausnahme stellen die auf Grund der verletzten Varianzhomogenität korrigierten α -Fehler auf 0,025 dar, die explizit angegeben werden. An entsprechender Stelle wird auf den Anhang verwiesen, in dem für jeden durchgeführten Test die Signifikanztabellen einzusehen sind. Die Anpassung des Konfidenzintervalls der Mehrfachvergleiche zwischen den Mikrofonen wurde nach Bonferroni durchgeführt. Dadurch wird die globale Erhöhung der α -Fehlerwahrscheinlichkeit, die durch multiples Testen in derselben Stichprobe auftritt, zu gleichen Teilen auf die Einzeltests verteilt [22]. Es wurde für jedes Attribut eine zweifaktorielle ANOVA durchgeführt, um die Abhängigkeit der Bewertung der Mikrofone vom gewählten Klangbeispiel zu untersuchen. Bei allen Attributen musste die Annahme der Varianzhomogenität über die Gruppe der Klangbeispiele verworfen werden. In Tabelle 3.3 sind die entsprechenden statistischen Werte angegeben. Die Verteilung der Mittelwerte (Randmittel) der Mikrofone pro Attribut, in Abhängigkeit vom Klangbeispiel, ist im folgenden Abschnitt in den Abbildungen 3.4, 3.5, 3.7, 3.8 und 3.9 dargestellt. Diese zeigen die unterschiedliche Bewertung in Abhängigkeit des Klangbeispiels deutlich. Aufgrund dieser Unterschiede wurde für jedes Attribut in Abhängigkeit vom Klangbeispiel eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt. Die Einteilung der Ergebnisse erfolgte nach den Membranparametern Form, Material und Kontaktierung. Die Ergebnisse der ANOVA finden sich im Anhang B.3, Abbildungen B.3.1, B.3.2, B.3.3 und B.3.4.

Um eine Vergleichbarkeit aller untersuchten Mikrofone auch messtechnisch zu gewährleisten, wurden von allen Prüflingen die Amplituden- Frequenzgänge mit Hilfe von Sinussignalen bei 0° und 180° im gleichen Messraum der Firma Microtech Gefell ermittelt (Messergebnisse siehe Anhang A).

3.2. Ergebnisse

Im Folgenden finden sich die Ergebnisse der Hörtests. Diese sind zu Gunsten der Übersichtlichkeit anhand der sogenannten “Randmittel” aufgezeigt, also den Mittelwerten der subjektiven Bewertungen der Probanden.

Bass/Höhen Balance Der Levene-Test (siehe Anhang B.2, Abbildung B.1) zeigt, dass nur das Klangbeispiel “Hancock” Varianzinhomogenität aufweist. Der F_{max} -Wert ist bei dem Klangbeispiel “Hancock” kleiner als 10. Entsprechend wurde keine Anpassung des α -Fehlers vorgenommen. Die Signifikanztabellen der Paarvergleiche in Abhängigkeit vom Klangbeispiel sind im Anhang B.3.1 zu finden. In Abbildung 3.4 sind die Randmittel des Attributs “Bass/Höhen-Balance” dargestellt. Daraus sind folgende Unterschiede ersichtlich:

Bei der Bewertung scheint ein direkter Zusammenhang mit den gemessenen Amplituden-Frequenzgängen der untersuchten Mikrofone herstellbar zu sein. Das bedeutet, dass die objektive Messung mit Sinussignalen und die daraus resultierenden Amplituden-Frequenzgänge mit der subjektiven Empfindung von “Bass/Höhen-Balance” zu korrespondieren scheint (vgl. Anhang B.3.1 mit den technischen Parametern aus A). Die Dreiecks-kapsel, sowie die Kleinmembranen M70 (Nickel und PET) werden - beinahe unabhängig vom Testsignal - als höhenlastig wahrgenommen. Die rechteckige ELMC-Kapsel wird ebenso wie das C414 als basslastig wahrgenommen. Klassische Großmembran-Kapseln erweisen sich als relativ neutral (siehe M71 und M930).

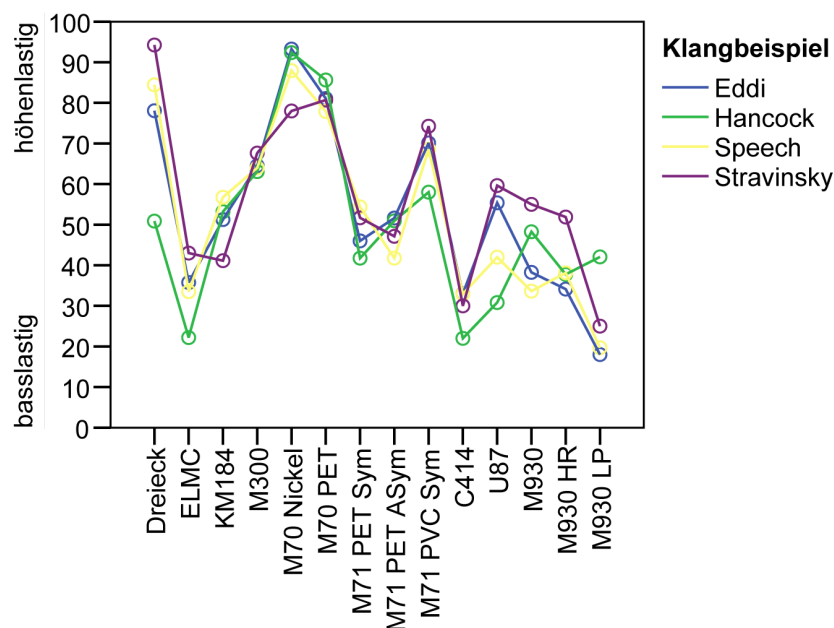


Abbildung 3.4.: Randmittel des Attributs “Bass/Höhen-Balance”

Nähe Der Levene-Test (vgl. Anhang B.2, Abbildung B.3) ist für keines der Klangbeispiele signifikant. Die Signifikanztabellen der Paarvergleiche in Abhängigkeit vom Klangbeispiel sind im Anhang B.3.3 zu finden. In Abbildung 3.5 sind die Randmittel des Attributs “Nähe” dargestellt.

Die Beurteilung des Attributs Nähe zeigt, dass Metallmembranen (Dreieck und M70 Nickel) als fern wahrgenommen werden, Großmembrankapseln (wie M71, U87 und vor allem C414, M930 sowie die Rechteckkapsel ELMC) klingen nah. Damit fällt die Beurteilung der “Nähe” ähnlich aus, wie die der “Bass/Höhen-Balance” (siehe Abbildung 3.6).

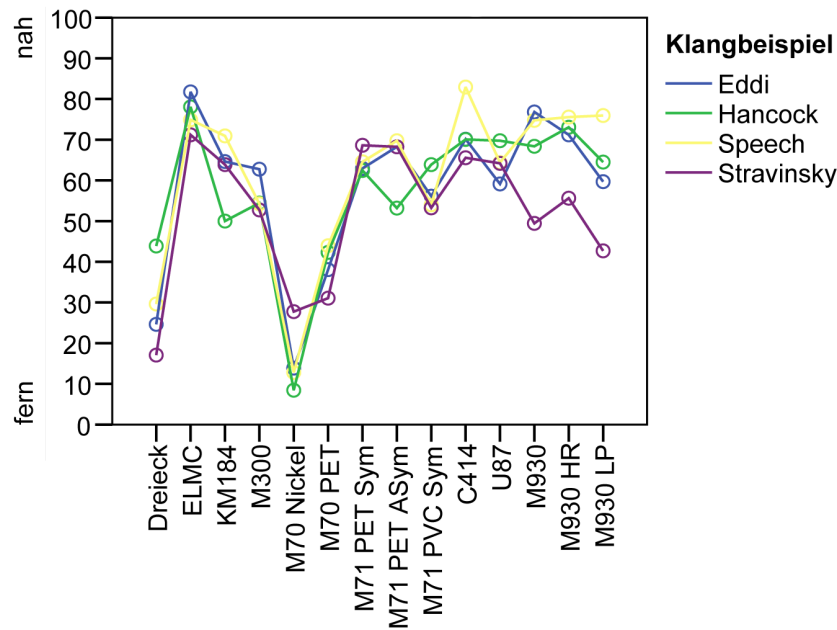


Abbildung 3.5.: Randmittel des Attributs “Nähe”

Der Test zeigte, dass basslastige Mikrofone subjektiv näher wahrgenommen werden, als höhenlastige. Diese wurden als “fern” klingend wahrgenommen. Bei monofoner Kopfhörerwiedergabe hängt die Entfernungswahrnehmung nach Blauert [16] von der Lautstärke und der Klangfarbe ab. Nachdem die Lautstärke im Test konstant war, kann zur Beurteilung der Nähe nur noch die Klangfarbe als Unterscheidungskriterium ins Gewicht fallen. Dies ist zu sehen in Abbildung 3.6. Hier wurden die Ergebnisse von “Nähe” und “Bass/Höhen-Balance” in einem Diagramm zusammengebracht. Sowohl der Verlauf der Kurve als auch die Beurteilung der einzelnen Mikrofone lässt auf einen subjektiven Zusammenhang von “Nähe” und “Bass/Höhen-Balance” bei der Bewertung schließen.

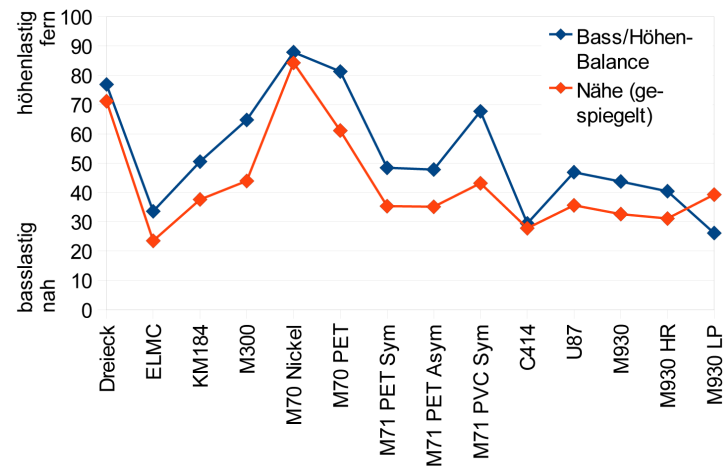


Abbildung 3.6.: Vergleich der Ergebnisse der Attribute “Nähe” und “Bass/Höhen-Balance”

Transparenz Der Levene-Test (siehe Anhang B.2, Abbildung B.4) zeigt, dass nur die Klangbeispiele “Eddi” und “Stravinsky” Varianzhomogenität aufweisen. Die F_{max} -Werte bei den Klangbeispielen “Hancock” und “Speech” sind kleiner als 10. Somit musste keine Anpassung des α -Fehlers vorgenommen werden. Die Signifikanztabellen der Paarvergleiche in Abhängigkeit vom Klangbeispiel sind zu sehen im Anhang B.3.4. In Abbildung 3.7 sind die Randmittel des Attributs “Transparenz” dargestellt.

Bei der Bewertung der “Transparenz” zeigt sich der Einfluss von Membranmaterial und -form in Abhängigkeit vom Klangbeispiel deutlich. Ein direkter Bezug der gemessenen Amplituden- Frequenzgänge (siehe Anhang A) der Mikrofone auf die Beurteilung der “Transparenz” ist grundsätzlich nicht zu erkennen. Bestätigt wird dieser Umstand durch die deutlich abweichende Beurteilung der “Bass/Höhen-Balance” bei den Mikrofonen, die im vorliegenden Fall als ähnlich transparent eingestuft worden sind (bspw. ELMC und M71 PVC Sym). Es ist ein leichter Zusammenhang zwischen höhenlastigen und transparent eingestuften Mikrofonen erkennbar (vgl. Amplituden- Frequenzgänge im Anhang A) - abgesehen von der Dreiecks- und der M70 Nickel Membran, die durch ihren unausgeglachten Frequenzgang eher als ”verwaschen” wahrgenommen werden (Abbildung 3.7). Vor allem die Kleinmembran-Kapsel M300 wird ebenso wie die M71 PVC Sym subjektiv als transparent bezeichnet. Die Dreieckskapsel zeigt beim Sprachsignal die beste Bewertung, bietet jedoch bei allen anderen Signalen mit M70 Nickel und M930 LP eine subjektiv verwaschen klingende Aufzeichnung.

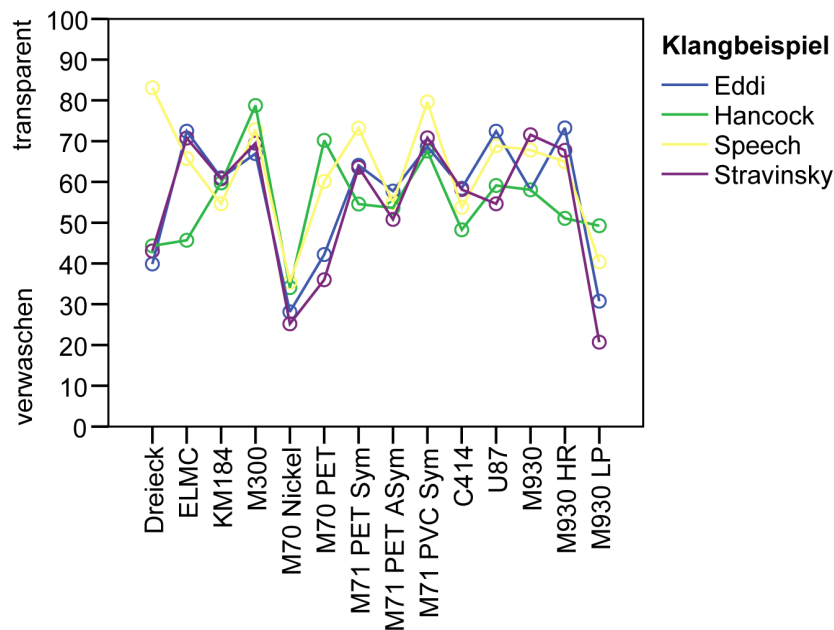


Abbildung 3.7.: Randmittel des Attributs “Transparenz”

Natürlichkeit Der Levene-Test (siehe Anhang B.2, Abbildung B.2) zeigt, dass nur die Klangbeispiele “Hancock” und “Speech” Varianzhomogenität aufweisen. Nur der F_{max} -Wert beim Klangbeispiel “Eddi” ist mit 13,854 größer als 10. Somit wurde eine Anpassung des α -Fehlers auf 0,025 vorgenommen. Die Signifikanztabellen der Paarvergleiche in Abhängigkeit vom Klangbeispiel sind im Anhang B.3.2 zu finden. In Abbildung 3.8 sind die Randmittel des Attributs “Natürlichkeit” dargestellt.

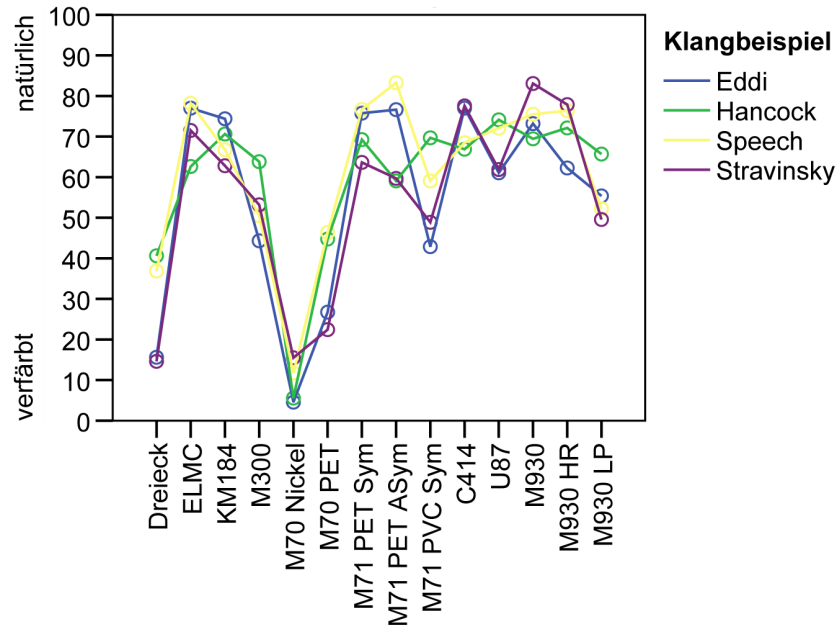


Abbildung 3.8.: Randmittel des Attributs “Natürlichkeit”

Im Allgemeinen zeigte sich, dass Großmembran-Mikrofone mit PET-Membranen natürlicher klingen, als die aus PVC und Nickel. Die Kapsel in Dreiecksform und die M70-Kleinmembrankapseln mit Nickel- und PET-Membranen wurden als verfärbt beurteilt. Der gemessene Frequenzgang (siehe Anhang A) zeigt aber bereits Unausgeglichheiten und Nichtlinearitäten. Bei dem Klangbeispiel “Speech” ist eine natürliche Klangeigenschaft bei Großmembran-Kapseln festzustellen. Dies wird in der Praxis durch die Wahl derartiger Mikrofone bei Sprach- und Gesangsaufnahmen bestätigt. Die Rechteckmembran wird als sehr natürlich klingend bezeichnet. Dies kommt bei allen Klangbeispielen zum Tragen, ausgenommen der Klavieraufnahme “Hancock”. Es ist festzustellen, dass die als sehr transparent eingestufte M71 PVC Membran nicht im gleichen Maße als natürlich beurteilt wurde. Im Gegensatz dazu wurde das M930 bei dem Klangbeispiel “Stravinsky” am natürlichsten und ebenso als transparent bewertet. Auch die M71 PET Membranen zeigen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Transparenz und Natürlichkeit. Auffallend ist jedoch ihre hohe Bewertung bei den Klangbeispielen “Speech” und “Eddi”. Dies lässt wiederum auf die unterschiedlichen Klangeigenschaften des Membranmaterials (PVC und

PET) schließen. Es ist zu vermuten, dass PVC Membranen Schallquellen der ersten Klasse (siehe Kapitel 2.1), also stationäre periodische Schwingungen deren Spektrum aus Harmonischen besteht (v.a. Sprache, Streich- und Blasinstrumente), transparenter abbilden. Dabei verfärben sie aber gleichzeitig den Klang. PET Membranen weisen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Transparenz und der Natürlichkeit gegenüber diesen Signalen auf.

Die schlechtere Bewertung des M300 gegenüber dem KM184 ist beim Klangbeispiel “Eddi” zu erkennen, was auf eine Überbetonung des Frequenzbereichs um 9 kHz beim M300 zurückzuführen ist (vgl. Amplituden- Frequenzgänge im Anhang A.8 und A.10). Dadurch klingt der Gesang hörbar verfärbt. Auch die asymmetrische Kontaktierung zeigt beim Klangbeispiel “Speech” eine weniger transparente, aber natürlichere Bewertung, als die symmetrische Kontaktierung (vgl. Abbildung 3.8). Dies ist wiederum nur als minimaler Effekt zu interpretieren und bedarf weiterer Untersuchungen.

Allgemeines Ranking Das “allgemeine Ranking” der Mikrofone sollte nur qualitativ interpretiert werden, da es eine sehr subjektive Einschätzung der Probanden zu den jeweiligen Kapseln darstellt. Die Abbildung 3.9 zeigt das Randmittel über alle Klangbeispiele. Auffallend ist vor allem die schlechtere Bewertung der Dreiecksmembran und der beiden M70 Kapseln. Als Tendenz fällt die bessere Bewertung des M70 PET im Vergleich zum M70 Nickel und die etwas schlechtere Beurteilung des M71 PVC Sym zum M71 PET Sym auf. Alle anderen Mikrofone wurden als relativ homogen beurteilt. In Abhängigkeit vom Klangbeispiel zeigten sich noch weitere Effekte: Die Dreiecksmembran wurde bei den Klangbeispielen “Speech” und “Hancock” deutlich besser bewertet, als bei den beiden anderen (“Eddi” und “Stravinsky”). Desweiteren fällt die bessere Bewertung der symmetrischen und asymmetrischen M71 PET-Membran beim Klangbeispiel “Eddi” auf. Hier ist auch der Unterschied zwischen der M71 PET Sym und der M71 PVC Sym am größten, wobei letztere schlechter bewertet wurde. Bei den Kleinmembran-Kapseln zeigt sich eine bessere Bewertung des KM184 gegenüber dem M300. Beim Klangbeispiel “Hancock” schneidet die PVC- gegenüber der PET-Membran geringfügig besser ab. Das U87 klingt bei “Hancock” am besten. Bei diesem Klangbeispiel ist auch der größte Unterschied zwischen den M70 Kapseln mit Nickel- und PET-Membranen festzustellen.

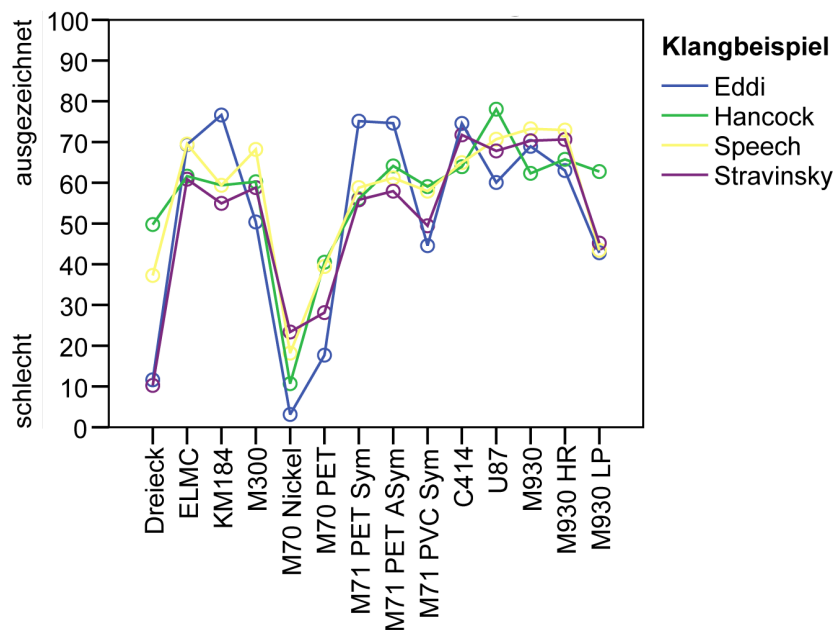


Abbildung 3.9.: Randmittel des Attributs “Allgemeines Ranking”

3.3. Kapitelzusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Mikrofone relativ starke und eindeutig hörbare Unterschiede aufweisen, die sich auf bestimmte Membranparameter zurückführen lassen. Die Beurteilung der Klangeigenschaften ist jedoch stark vom Klangbeispiel abhängig. Dies wird durch die Bevorzugung bestimmter Mikrofonmodelle in der Praxis - je nach Anwendungszweck - bestätigt. Generelle Aussagen über den Klang von Kapseln sind weitestgehend nicht möglich. So wurde die Dreiecksmembran bspw. bei Betrachtung des Musikbeispiels "Stravinsky" als außerordentlich höhenlastig bewertet, bei der Wandlung des Sprachsignals "Speech" hingegen als analytisch und transparent.

Das Membranmaterial scheint im Allgemeinen einen größeren Einfluss auf die klanglichen Eigenschaften eines Mikrofons zu haben als die Membranform, die elektrische Kontaktierung der Membran hingegen weniger. PET-Membranen werden natürlicher klingend wahrgenommen als PVC und Nickel, denen eher die Eigenschaft "klar" und "spitz" zugeordnet wird. Kleine kreisförmige Membranen wirken bei Flügelaufnahmen natürlicher, große kreisförmige Membranen wiederum bei Sprachsignalen. Rechteckigen Membranen können allgemein gute Klangeigenschaften zugesprochen werden.

Eine mögliche Erklärung der eklatanten Klangunterschiede zwischen goldbedampften Kunststoffmembranen und Nickel-Membranen ist die höhere Steifigkeit von Nickel im direkten Vergleich der Elastizitätsmodule (Nickel ca. $200 \frac{kN}{mm^2}$ und Gold ca. $70 \frac{kN}{mm^2}$). Allerdings haben Nickelmembranen eine geringere Masse als goldbeschichtete Kunststoffmembranen, allein schon wegen der Dichte (ρ) des Metalls (Nickel $8,90 \frac{kg}{dm^3}$ und Gold $19,32 \frac{kg}{dm^3}$). Sie sollten damit der Luftmolekülschwingung schneller folgen können. Trotzdem klingen Kunststoffmembranen subjektiv angenehmer.

Mikrofone mit annähernd gleichen Amplituden- Frequenzgängen zeigen bei unterschiedlichen Anregungssignalen starke klangliche Unterschiede. Die Attribute "Nähe" und "Bass/Höhen-Balance" scheinen im Zusammenhang zu den gemessenen Amplituden- Frequenzgängen der Mikrofone zu stehen.

Die evaluierten Attribute können zur Beurteilung der Klangeigenschaften von Mikrofonen herangezogen werden. Besonders geeignet sind "Transparenz" und "Natürlichkeit", da diese Eigenschaften nicht aus den üblichen Messdaten¹⁴ ersichtlich sind. Jedoch stellt eine hohe Transparenz nicht unbedingt ein Kriterium für eine allgemeine gültige, subjektiv gute Qualitätsbeurteilung dar. So klingt die Dreieckskapsel bei Sprachsignalen transparent, wird aber gleichzeitig bei anderen Signalen als verwaschen wahrgenommen (siehe Abbildung 3.7).

Trotzdem können die Ergebnisse der Hörtests zum subjektiven Klang der Wandler mit den objektiven Messergebnissen aus der optischen Abtastung verglichen und entsprechende Rückschlüsse von Schwingungs- und Klangeigenschaften gezogen werden. Dies soll in Kapitel 5 erfolgen.

¹⁴ Amplituden- Frequenzgänge, Polardiagramme

4. Messaufbau zur optischen Abtastung

Die Abtastung von schwingenden Mikrofonmembranen erfordert ein berührungsloses Messsystem, da ein auf die Membran aufgebrachter Sensor u.a. durch sein Eigengewicht Einfluss auf die Schwingung nehmen würde. Wie bereits im Abschnitt 2.5 erläutert, wurde auf ein Homodyninterferometer der Firma SIOS Meßtechnik GmbH zurückgegriffen. Dieses eignet sich dazu, die kleinen Schwingungen der Membran abzutasten und die Schwingung anschließend auszuwerten. Neben dem Messsystem ist eine Reihe weiterer Komponenten nötig, um die Untersuchungen vornehmen bzw. anschließend auswerten zu können. Der daraus resultierende Messplatz soll im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

4.1. Aufbau des Messplatzes

Es wurde ein Messplatz eingerichtet, um die Schwingungen auf den geometrisch unterschiedlichen Membranflächen untersuchen zu können. Die elf benötigten Komponenten korrespondieren mit den Nummern in Abbildung 4.1 und sind anschließend einzeln erklärt.

- schwingungsisiolierte Fläche (1)
- X-Y-Kreuztisch (2)
- Prüflinge (3)
- Sensorkopf (4)
- Auswerteeinheit (5)
- stabilisierter He-Ne-Laser (6)
- Messrechner (7)
- Hochvolt-Verstärker (8)
- Oszilloskop (9)
- Frequenzgenerator (10)
- Kreuztisch-Steuerung (11)

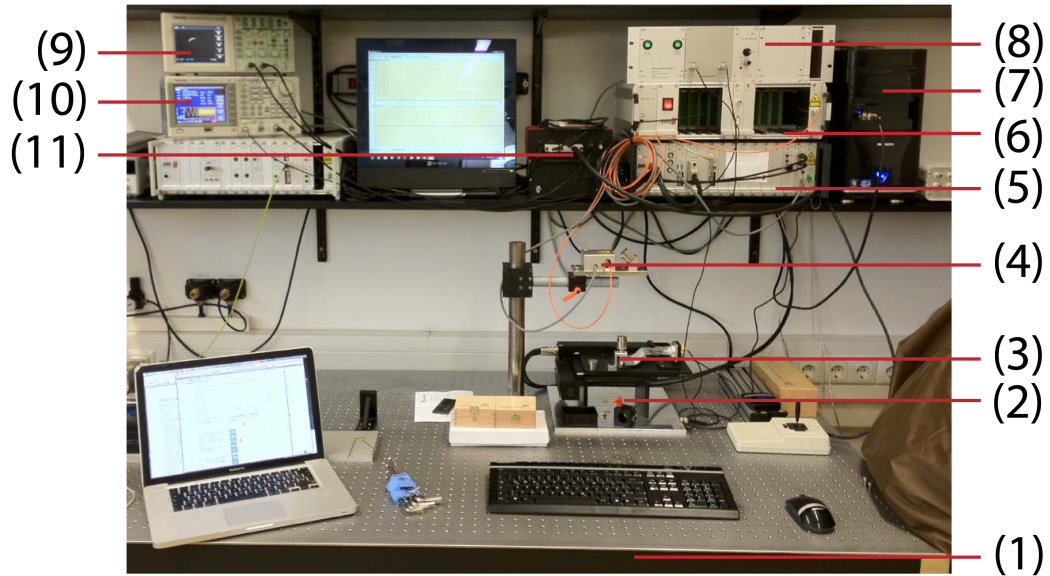


Abbildung 4.1.: Aufbau des Messplatzes bei SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau

Die schwingungsisolierte Fläche (1) gewährleistet, dass die Messungen frei von extern eingekoppelten Schwingungen (beispielsweise über den Fußboden) erfolgen können. Der X-Y-Kreuztisch (2) bewegt den Prüfling (3) unter dem Messstrahl. Der Sensorkopf (4) emittiert den Messstrahl und koppelt diesen wieder in das Messsystem ein. Anschließend wird das Signal mit Hilfe der Auswerteeinheit (5) demoduliert und die Messwerte aufgezeichnet. Bei dem in Kapitel 2.5 gezeigten Messsystem kommt ein stabilisierter He-Ne-Laser (6) zu Einsatz. Der Messrechner (7) liest die gemessenen Werte aus dem Speicher des Interferometers. Diese werden zur späteren Auswertung auf dem Rechner gespeichert. Der Hochvolt-Verstärker (8) ermöglicht es, die Wechselspannung zur Schwingungsanregung nach der Reziprozitätsmethode auf die Polarisationsspannung der Kondensatormikrofon-Kapseln zu modulieren. Das Oszilloskop (9) dient der Überwachung des Messsignals. Ein Frequenzgenerator (10) liefert die unterschiedlichen Anregungssignale. Die Kreuztisch-Steuerung (11) setzt die gewünschten Rasterwerte für den Scan der Membran um und ermöglicht somit einen Raster-Scan nach beliebig programmiertem Muster. Eine schematische Übersicht des beschriebenen Aufbaus ist zu finden in Abbildung 4.2.

Bei der Durchführung eines Flächenscans mussten einige Grundsätze beachtet werden:

Die Aufnahme der einzelnen Messwerte erfolgte unter Zuhilfenahme des Planspiegelinterferometers SP-S der Firma SIOS. Um eine flächige Messung zu realisieren und die einzelnen Komponenten zu synchronisieren, mussten mehrere Routinen entwickelt werden. Hierzu kam das Scripting-Tool (ebenfalls von SIOS) zum Einsatz und wurde entsprechend der Anforderungen optimiert. Der Prüfling sollte u.a. zeilenweise flächig gescannt werden. Die Scan-Auflösung muss dem Abtasttheorem entsprechen. Nach Möser [83] ist zu beachten, dass bei Messungen von Schwingungsmoden als obere Grenze der Abstände

zwischen den Messpunkten etwa $\frac{\lambda}{6}$ gewählt werden muss. Bei einer maximal zu messenden Frequenz von bspw. 40 kHz ergibt sich eine Rasterweite von mindestens $1,43\text{ mm}$. Das gewählte Scan-Raster mit einem Punktabstand von 1 mm ist für die Messung und Visualisierung der zu erwartenden Moden somit hinreichend genau.

Zur Abtastung der Membran in Form eines Flächenscans bewegt der X-Y-Kreuztisch den Prüfling unter dem Messstrahl nach vorgegebenem (programmiertem) Muster. Die Abtastung erfolgt punktwise seriell hintereinander im Rasterabstand. Ein programmierbarer Frequenzgenerator liefert die entsprechenden Messsignale zur reziproken Schwingungsanregung der Mikrofonmembran. Das Generatorsignal wird verstärkt und auf die Speisespannung (200 V bei Messmikrofonkapseln, 80 V bei Studiomikrofonkapseln) aufmoduliert. Hierzu wurde ein entsprechender Verstärker entwickelt und realisiert, der die größtmögliche Impulstreue gewährleistet, um die Messergebnisse der Schwingungsausbreitung nicht zu verfälschen (Bodediagramm, siehe Anhang D.1).

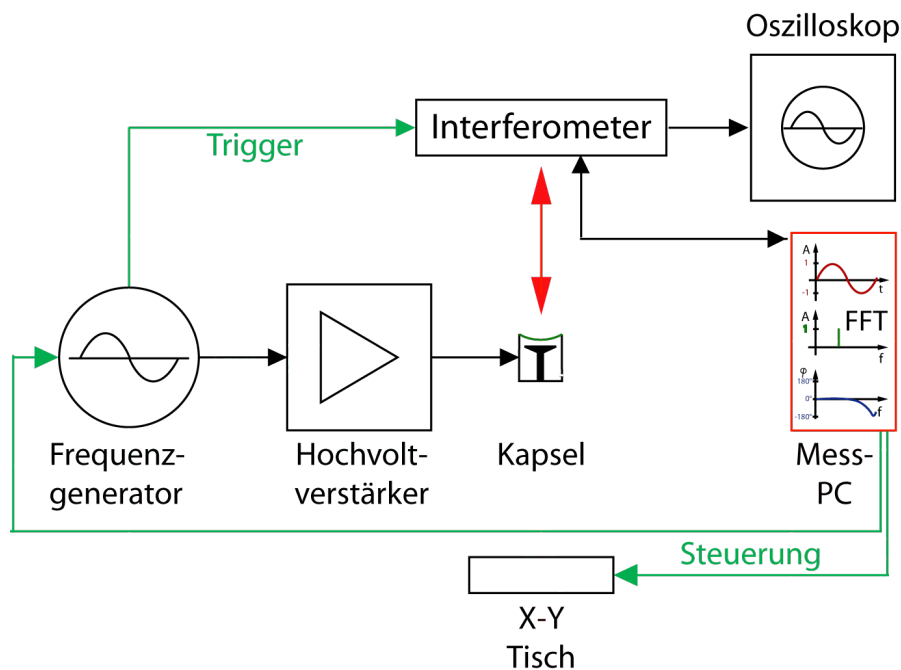


Abbildung 4.2.: schematischer Aufbau des Messplatzes zur optischen Abtastung von schwingenden Membranen

Wenn der Prüfling mit der Reziprozitätsmethode (siehe Abschnitt 2.3) zum Schwingen angeregt wird, kann die Membranfläche punktwise abgetastet werden. Um die Phasenrichtigkeit der einzelnen Messungen zu sichern, wird der TTL¹-Steuerimpuls des Frequenzgenerators beim Beginn des Anregungssignals zum Start der jeweiligen punktuellen Schwingungsaufnahme verwendet. Somit ist die Reproduzierbarkeit gewährleistet und die Messwertketten können bei der Auswertung miteinander derart in Korrelation

¹Transistor-Transistor-Logik

gebracht werden, dass eine gleichmäßig schwingende Fläche visualisiert werden kann. Die Auswertung der Messwerte erfolgte unter Zuhilfenahme von Matlab. Auch hier wurden unterschiedliche Auswertemethoden (siehe Kapitel 4) angewandt und untersucht. Der schematische Aufbau des Messplatzes ist zu sehen in Abbildung 4.2.

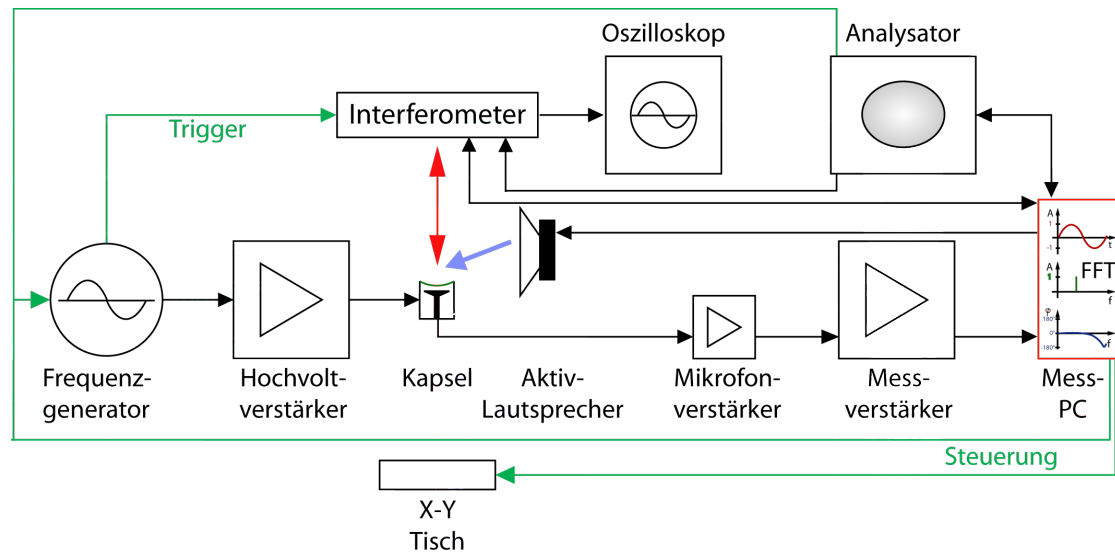


Abbildung 4.3.: schematischer Messaufbau - erweitert um Luftschallanregung mit Hilfe eines Lautsprechers

Um die Ergebnisse der Hörtests mit der unmittelbaren Membranschwingung in Korrelation bringen zu können, wurde ein weiterer, kombinierter Messstand entwickelt, der die Membran sowohl reziprok, als auch durch Luftschall in Bewegung versetzt (siehe Abbildung 4.3). Die resultierenden Signale können gleichzeitig elektrisch und optisch abgenommen werden. Bei gleicher Abtastrate und Auflösung lassen sich die Signale anschließend direkt miteinander vergleichen und weiterverarbeiten bzw. auswerten. Hierzu musste der dargestellte Aufbau um mehrere Komponenten erweitert werden: Zur akustischen Schwingungsanregung kam ein ME-Geithain² Regielautsprecher zum Einsatz. Außerdem mussten verschiedene Mikrofonverstärker integriert werden, um die entstehenden Signale akustisch zu verstärken und zur weiteren Bearbeitung und Auswertung aufzuzeichnen. Damit können die Prüflinge bei gleichen Anregungssignalen sowohl akustisch (über Luftschall) als auch reziprok in Schwingung versetzt werden. Diese wiederum kann gleichzeitig optisch und akustisch gemessen sowie die daraus resultierenden Signale gespeichert werden. Bei gleichen Aufnahme-Parametern ist ein Vergleich der Signale in einer handelsüblichen Recording-Software möglich und sinnvoll. Hierbei können gebräuchliche Analysemethoden angewandt werden (Fourieranalyse, Waveletanalyse). Zur besseren Reproduzierbarkeit und Analysemöglichkeit, bzw. um das System auch praxistauglich dar-

²RL906

zustellen, wurde ein Audi-/NF-Analysator³ eingesetzt. Das gezeigte Verfahren eignet sich zur Primärkalibrierung von Mikrofonkapseln (Druck- und Druckgradientenempfänger, bzw. Mess- und Studiomikrofone).

Die Untersuchungen mit Hilfe des kombinierten Messstandes - insbesondere bei der akustischen Anregung - wurden lediglich exemplarisch unternommen. Durch die gegebenen Umstände (v.a. die Raumakustik sowie Einfluss von Störgrößen wie Lüftergeräuschen oder anderen Umwelteinflüssen) ist die Interpretation der Ergebnisse aus der akustischen Anregung schwer möglich. Selbst wenn ein isolierter Kasten um den kompletten Messaufbau installiert wird, in den Lautsprecher und Sensorkopf des Interferometers eingepackt sind, bilden diese beiden Elemente zusammen mit dem X-Y-Positioniertisch, auf dem der Prüfling aufgebracht ist, jeweils schallharte Flächen, die die Akustik stark beeinflussen. Lediglich der Vergleich von elektrischer und optischer Messwertaufnahme lässt eine direkte Gegenüberstellung dieser beiden Verfahren der Messung zu.

³Rohde&Schwarz UPV66

4.2. Signal- und systemtheoretische Betrachtung

Um die aus der Schwingung der Membranen resultierenden Daten analysieren und auswerten zu können, bedient man sich eines Hilfsmittels: der Signal- und systemtheoretischen Betrachtung. Hierbei wird die Mikrofon-Kapsel mit vorgeschaltetem Verstärker als geschlossenes System betrachtet, dessen Reaktion auf ein vorgegebenes Eingangssignal mathematisch beschrieben werden kann [131, 133].

Bei den vorliegenden Kapselkonstruktionen handelt es sich um ein lineares zeitinvariantes System, kurz LTI-System, das sowohl die Eigenschaft der Linearität aufweist als auch unabhängig von zeitlichen Verschiebungen ist. Diese Unabhängigkeit von zeitlichen Verschiebungen wird als Zeitinvarianz bezeichnet. Diese Systeme weisen besonders einfache Transformationsgleichungen auf und sind damit der Systemanalyse leicht zugänglich. Viele technische Systeme (bspw. in der Nachrichten- oder Regeltechnik) haben diese Eigenschaften - zumindest in guter Näherung. Einige LTI-Systeme lassen sich durch gewöhnliche lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten beschreiben [120, 131, 133]:

Ein System gilt dann als linear, wenn jede Summe von beliebig vielen Eingangssignalen $s_i(t)$ zu einer dazu proportionalen Summe von Ausgangssignalen $g_i(t)$ führt. Damit muss das Superpositionsprinzip gelten. Mathematisch wird dies durch eine Transformation τ (diese stellt die Übertragungsfunktion des Systems dar), zwischen den Ein- und Ausgangssignalen folgendermaßen beschrieben:

$$\sum_i a_i g_i(t) \equiv \sum_i a_i \tau \{s_i(t)\} = \tau \left\{ \sum_i a_i s_i(t) \right\} \quad (4.1)$$

Die konstanten Koeffizienten a_i sind die einzelnen Proportionalitätsfaktoren.

Anschaulich wird dabei der Eingang eines Systems mit einem Signal versorgt und die Reaktion des Systems beobachtet. Anschließend wird - unabhängig davon - die Reaktion auf ein weiteres Signal untersucht. Wenn das System linear ist, lässt sich beim Anlegen eines Eingangssignals, welches die Summe aus den beiden zuvor einzeln begutachteten Signalen bildet, feststellen, dass die Reaktion am Ausgang der Addition der beiden einzelnen Antworten entspricht.

Ein System heißt dann zeitinvariant, wenn für jede beliebige Zeitverschiebung t um t_0 gilt:

$$\tau s(t - t_0) = g(t - t_0) \quad (4.2)$$

Das bedeutet, der Zeitbezug des Ausgangssignals zum Eingangssignal muss beibehalten werden und das System muss identisch reagieren. Dieses Prinzip wird auch als Verschiebungsprinzip bezeichnet.

Das beliebig verlaufende Eingangssignal $s(t)$ kann durch Anwendung des Superpositionssatzes und der Zeitinvarianz angenähert werden. Dies geschieht durch eine zeitliche Abfolge von einzelnen Rechteckimpulsen. Im Grenzübergang für einen Rechteckimpuls dessen Dauer gegen 0 verläuft, nähert sich das Ausgangssignal einer Form an, welche

nur noch von der Übertragungsfunktion des Systems abhängt, aber nicht mehr vom Verlauf des Eingangssignals. Mathematisch werden Rechteckimpulse, deren zeitliche Dauer gegen Null strebt, durch Dirac-Impulse $\delta(t)$ beschrieben. Die Summen in der Transformationsgleichung gehen in Integrale über. Das Eingangssignal $s(t)$ lässt sich gleichwertig als Faltungsintegral (mit dem Symbol $*$ für die Faltungsoperation) ausdrücken als:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)\delta(t-\tau)d\tau = s(t)*\delta(t) \quad (4.3)$$

Das Ausgangssignal $g(t)$ ist über das Faltungsintegral

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)\delta(t-\tau)d\tau = s(t)*h(t) \quad (4.4)$$

mit dem Eingangssignal $s(t)$ verknüpft. Die Funktion $h(t)$ wird als Impulsantwort bezeichnet, womit das Faltungsintegral eine für LTI-Systeme allgemein gültige Transformation darstellt [71, 120, 131, 133].

Der resultierende Messaufbau, bestehend aus Generatorsignal, Anregungssignal zur reziproken Schwingungsanregung und Auswertung mit Hilfe der FFT⁴ ist schematisch zu sehen in Abbildung 4.4.

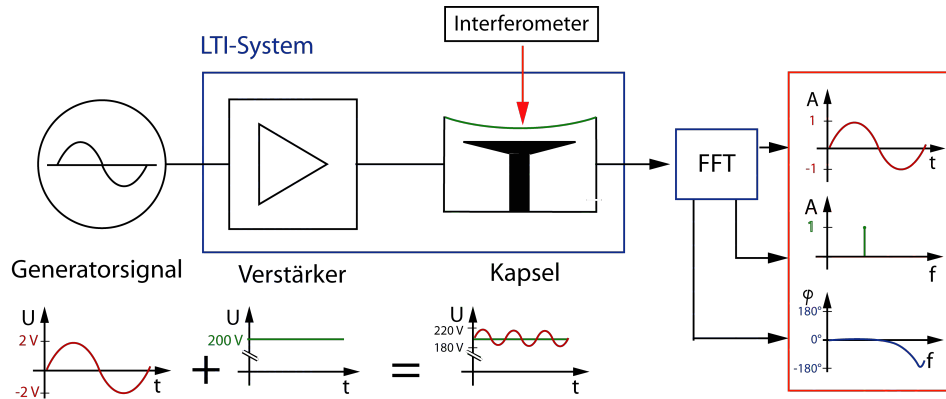


Abbildung 4.4.: LTI-System mit FFT-Auswertung

⁴Fast-Fourier-Transformation

4.3. Verwendete Messsignale

Sinus Bei der Bestimmung von Amplituden- Frequenzgang, der Kalibrierung und bei der Erstellung der individuellen Polardiagramme ist in der gängigen Praxis eine Messung mit (Multi-)Sinus-Signalen üblich. Hier wird die Membran mit Hilfe eines Lautsprechers über Luftschall angeregt und in eingeschwungenem Zustand mit einer Folge von Sinustönen vermessen, das Signal aufgezeichnet und mit Hilfe der FFT⁵ ausgewertet (siehe Abschnitt 4.5.1). Aufgrund der Anordnung des Messsystems und der Integration eines Lautsprechers lassen sich nur schwer, bzw. keine Aussagen über die Frequenzbereiche außerhalb des hörbaren Bereiches (über 20 kHz) treffen. Durch die elektrostatische Schwingungsanregung fällt diese physikalische Grenze (ähnlich wie bei der Anwendung eines sogenannten Eichgitters bei der Kalibrierung von Messmikrofonen). Es sind theoretisch Aussagen über beliebige Frequenzbereiche bis zu einer Obergrenze von 1,5 MHz (Abtastgrenze der Interferometers: 3 MHz) möglich. So wurden verschiedene optische Messungen der Membranschwingung bei definierten Frequenzen durchgeführt. Diese Methode erwies sich im Verlauf der Arbeit als enorm zeitaufwendig. Außerdem lässt sie nur wenige Rückschlüsse auf die Schwingung zu, da nur ein minimaler Ausschnitt betrachtet wird (eingeschwungenes System, reiner Sinus, eine Frequenz). Diese "Reinform" der Schwingung kommt in der Natur praktisch nicht vor. Zudem ist das System "Mikrofonkapsel" bei der Wandlung in der Praxis selten im eingeschwungenen Zustand.

Um die Messung zu beschleunigen und zusätzlich das komplette Frequenzband zu betrachten, musste ein alternativer Weg gefunden werden. Zur Messung und Visualisierung der Schwingungsformen auf der Membran hat sich im Verlauf der Untersuchungen die Anregung mit Hilfe von Chirp-Signalen vor allem aus Zeitgründen als sinnvoll und zielführend erwiesen.

Chirp Bei einem Chirp handelt es sich um eine frequenzmodulierte Sinusschwingung gleicher Amplitude. Der Vorteil gegenüber der Messung mit Sinustönen einzelner, bestimmter Frequenzen ist, dass innerhalb der festgelegten Chirp-Grenzen Aussagen zu allen beinhalteten Frequenzen möglich sind. Für die Auswertung der Messungen wurden verschiedene Routinen entwickelt, die - neben der Visualisierung des Übertragungsfrequenzgangs - auch entsprechende Aussagen über die Schwingung bei beliebig wählbaren Frequenzen zulassen.

Die Dauer einer Messung verkürzt sich damit im Vergleich zu der mit einzelnen, eingeschwungenen Sinustönen erheblich. Es werden nicht mehr einzelne Messreihen zu bestimmten festgelegten Frequenzen untersucht, sondern mit einem Scan über die Membranfläche gleich die komplette Bandbreite innerhalb der Chirp-Grenzen aufgezeichnet. Die Werte können anschließend betrachtet und die resultierenden Schwingungen frequenzspezifisch visualisiert werden.

⁵Fast-Fourier-Transformation

Ein logarithmischer Chirp ist im Zeitverlauf in der folgenden Form mathematisch zu beschreiben:

$$x(t) = \sin \left(\frac{2\pi f_1 T}{\ln(f_2/f_1)} \left[\exp \left(\frac{\ln(f_2/f_1) t}{T} \right) - 1 \right] \right) \quad (4.5)$$

mit T = Gesamtlänge (s) und f_1, f_2 = untere, obere Grenzfrequenz

Der Energiegehalt eines exponentiellen Chirp-Signals fällt mit steigender Frequenz linear [69].

Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch die optische Abtastung der Membranschwingung einer MK102⁶ und MK221⁷-Kapsel in der Mitte der Fläche bei reziproker Anregung mit einem exponentiellen Chirp-Signal $2 V_{pp}$ von 20 Hz bis 20 kHz . Die Membran des MK221 folgt dem Signal aufgrund der geringeren Membranmasse treuer in deutlich höhere Frequenzbereiche als die des MK102. In Abbildung 4.5 ist gut zu erkennen, dass die Schwingungsamplitude der MK221-Membran erst nach $0,9 \text{ s}$ einzubrechen beginnt, das MK102 bereits nach $0,6 \text{ s}$.

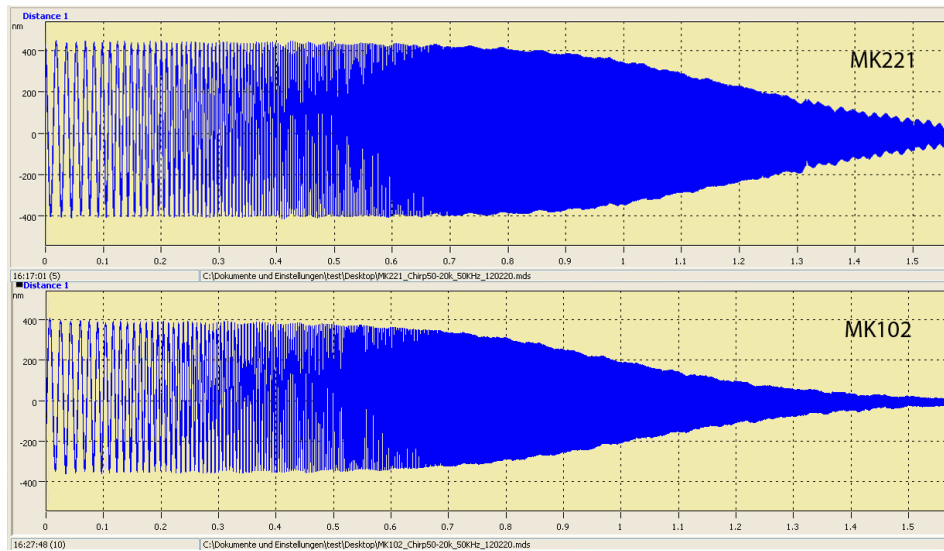


Abbildung 4.5.: reziproke Anregung, $2 V_{pp}$ - exp. Chirp 20 Hz - 20 kHz bei MK221 (oben) und MK102 (unten), Membranmitte, $f_{abtast}=50 \text{ kHz}$

Multisinus Ein weiteres Verfahren, das zur Kalibrierung von Messmikrofonen eingesetzt wird [123], sowie eine schnelle und sinnvolle Analyse des Kapselsystems zulässt, ist die Messung mit einem Multisinus-Ton. Dieser setzt sich aus Sinustönen verschiedener Frequenzen bei gleicher Amplitude zusammen. Im vorliegenden Fall wurden sechs unterschiedliche Frequenzen zur Schwingungsanregung so gewählt, dass sich die Obertöne der

⁶1" Messmikrofon

⁷1/2" Messmikrofon

Nummer	Frequenz in Hz
1	230,51
2	531,33
3	1224,74
4	2823,11
5	6507,41
6	15000,00

Tabelle 4.1.: Frequenzen des Multisinus-Tones

Grundfrequenz im hörbaren Bereich⁸ bis zu einer Ordnung von n^{48} nicht überschneiden. Diese sind zu sehen in Tabelle 4.1. Somit kann bei der Analyse schnell evaluiert werden, bei welcher Frequenz, bzw. bei welchen Obertönen eine Störung mit welchem Effekt auftritt. Entsprechend kann der Klirrfaktor der Kapsel schnell bestimmt werden.

Dieses Verfahren lässt jedoch keine vollumfängliche Aussage zu den Membranschwingungen des jeweiligen Kapselsystems zu und wurde daher nur experimentell angewandt. Ein Problem bei der Messung stellt der individuelle Phasenverlauf der jeweiligen Sinustöne bei der Anregung dar. Optische Messungen mit derartigen Anregungssignalen sind nicht reproduzierbar. Die Membranfläche kann nicht so abgetastet werden, dass sich die einzelnen Punkte anschließend phasenrichtig zusammensetzen lassen. Entsprechend ergibt sich bei der Auswertung ein scheinbares Schwingungsbild, bei dem Moden auftreten, wo in der Realität keine sind.

Rauschen Die Untersuchungen mit Hilfe eines weißen Rauschens⁹ lassen Rückschlüsse auf die Linearität des jeweiligen Kapselsystems zu. Wenn im Anregungssignal alle Frequenzen gleich verteilt vorkommen, sollten eventuelle Nichtlinearitäten bei der Messung mit derartigen Signalen in den Vordergrund treten. Jedoch ergaben die gemessenen Ergebnisse keine Abweichungen verglichen mit denen der Chirp-Messungen, bzw. der Übertragungsfunktionen der untersuchten Messmikrofon-Kapseln. Es konnten keine Frequenzen gefunden werden, die über das übliche Maß herausstachen, das System scheint somit resonanzfrei. Die Messungen wurden nur bei einigen Prüflingen der Druckempfänger¹⁰ zu vergleichenden Zwecken durchgeführt und nicht weiter betrachtet. Die resultierende Gesamtschwingung der Membran kann optisch durchaus als chaotisch bezeichnet werden.

⁸20 Hz - 20 kHz

⁹konstante Amplitude bei allen Frequenzen im Spektrum

¹⁰MK102, MK221

Rechteck/Burst Ein Rechteckimpuls ist eine periodische, komplexe Wellenform. Diese besteht aus Oberschwingungen durch ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz einer Sinusschwingung. Mit Hilfe eines Generators ist die Wiedergabe solcher Impulse einfach umsetzbar. Da sich ein Rechtecksignal aus Sinusschwingungen zusammensetzt ist es möglich, aus den Ergebnissen der Rechteck-Messungen die Übertragungsfunktionen bzw. Bode-Plots der analysierten Kapseltypen zu ermitteln. Dies stellt eine enorm schnelle, allerdings auch (bspw. im Vergleich zur Messung mit einzelnen Sinustönen) ungenaue Möglichkeit der Ermittlung und Analyse dar. Ergebnisse finden sich im Anhang C.1.1.

Ein Burst-Impuls ist ein einmaliger Impuls in positiver oder negativer Richtung. Der Vorteil zu anderen Signalen: Das System befindet sich im Ruhezustand, ist also nicht eingeschwingen.

Um Aussagen über den Einschwingvorgang (Transienten), die Bandbreite des Kapselsystems und den Ausschwingvorgang treffen zu können, wurden die Systeme mit verschiedenen Rechteck-Signalen ($+2\text{ V}$ Burst und $\pm 1\text{ V}$ Rechteck) angeregt. Die Messung der Antwort des Kapselsystems erfolgte in der geometrischen Mitte der Membran mit einer Abtastfrequenz von 500 kHz . Vor allem die Messung mit derartigen Signalen erfordert eine Verstärkerschaltung, die die Flankensteilheit der Anstiegsflanke des Generatorsignals überträgt, ohne diese zu beeinflussen oder zu verändern. Die Verstärkerschaltung, mit der die ersten Testmessungen unternommen wurden¹¹, zeigte an der Anstiegsflanke eine Modulation in der eigenen Resonanzfrequenz. Die letztlich verwendete Verstärkerschaltung ist jedoch in der Lage, auch derartige Signale verzerrungsfrei zu übertragen. Somit konnten alle Schwingungsmessungen durchgeführt werden, ohne eine Verzerrung der Messergebnisse durch den Einfluss der Verstärkung in Kauf nehmen zu müssen. Eine Stoßanregung mittels Generatorsignal ist ausschließlich reziprok möglich, da kein Lautsprecher (aufgrund der Masseträgheit der Membran) derartigen Impulsen treu folgen kann, die übertragen werden sollen. Peus untersuchte das Impulsverhalten von Mikrofonen bereits mittels Funkenknall [89]. In der vorliegenden Arbeit wurde die Schwingung bei impulshaften Signalen (Rechteck und Burst) mittels Reziprozitäts-Methode optisch abgetastet und untersucht.

¹¹EAG von MTG

4.4. Messmethoden

4.4.1. Punktuell

Beim Anlegen der Speisespannung bildet sich zwischen Membran und Gegenelektrode ein elektrostatisches Feld aus. Durch die auftretende Kraft verbiegt sich die Membran in Richtung der Gegenelektrode Δy (siehe Abbildung 4.6).

Hierdurch entsteht eine Kapazitätsänderung der Kondensatoranordnung¹². In der Praxis ist diese "Delta-C-Messung" ein Hilfsmittel, um Aussagen über die Größe der Anziehungskraft der Membran in Richtung Gegenelektrode im relativen Vergleich treffen zu können.

Mit Hilfe des Interferometers kann die reale Verbiegung oder Delokalisation der Membran genau bestimmt werden. Hierzu wird der Messstrahl auf die Mitte der Membran gerichtet und das Messsystem auf 0 gesetzt. Anschließend wird die Speisespannung auf die Kapsel geschaltet und die Delokalisation kann abgelesen werden.

Eine Übersicht der untersuchten MK221 - Kapseln findet sich in Tabelle 4.2. Zusätzlich wurden noch 1" - Kapseln vermessen (MK102 und M296 - eine für die Studioverwendung modifizierte Version der Messkapsel MK102). Die gemessenen Delokalisationen sind in Tabelle 4.2 und 4.3 gezeigt. Die einzelnen Kapseln unterscheiden sich sowohl im Material (Nickel und Edelstahl), der Membrandicke ($2\text{ }\mu\text{m}$ und $4\text{ }\mu\text{m}$) sowie in der mechanischen Spannung der Membran. Zum besseren Vergleich und zur Einordnung der Delokalisationswerte ist zusätzlich die Empfindlichkeit der Kapseln angegeben.

Die Delokalisation wurde bei allen Prüflingen gemessen. Sinnvoll ist der Vergleich der rotationssymmetrischen Kapseln ohne Mittenunterstützung. Sie lässt vor allem Aussagen über die mechanische Vorspannung zu. Diese wiederum beeinflusst die freie Schwingung der Membran in nicht unerheblicher Art und Weise. Je stärker die mechanische Vorspannung ist, umso unempfindlicher ist der Wandler im Schallfeld.

Tabelle 4.3 zeigt die Delokalisation bei unterschiedlichen Membrandurchmessern (1" MK102 und M296, sowie 1/2" MK221) und unterschiedlichen Elektrodenabständen bei den Prüflingen. Die Messung der Delokalisation lässt sich beispielsweise beim Hersteller ergänzend zur ΔC -Messung einsetzen. Bei baugleichen Kapseln (vgl. MK102 in Tabelle 4.3) ist die Membrandelokalisation entsprechend gleich. Die im Vergleich zur MK102 modifizierte Kapsel M296 weist einen größeren Elektrodenabstand auf. Entsprechend weniger stark ist das elektrostatische Feld ausgebildet und entsprechend weniger stark wirkt die Kraft. Die Membran wird weniger in Richtung Gegenelektrode gezogen. Zusätzlich ist die Membran beim M296 mechanisch geringer gespannt. Dieser Umstand kompensiert den um $8\text{ }\mu\text{m}$ größeren Elektrodenabstand jedoch nur zum Teil. Ähnliches gilt für die elektrische Spannung bzw. den Elektrodenabstand. Je kleiner dieser ist, desto mehr

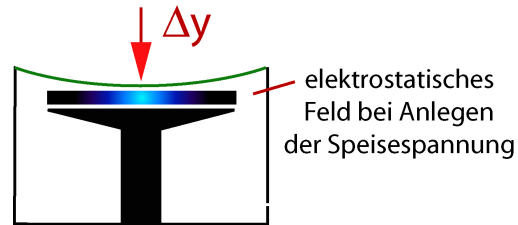


Abbildung 4.6.: elektrostatisches Feld

¹² ΔC

mechanische Membranspannung:	niedriger	standard	höher	Material/Dicke
Typ/Seriennummer	A1 / 35681	A2 / 32733	A3 / 35342	Nickel / 2 μm
Empfindlichkeit	63,2 mV/Pa	45,9 mV/Pa	38,5 mV/Pa	
Delokalisation (kurz)	4,38 μm	3,06 μm	1,14 μm	
Delokalisation (lang)	4,42 μm	3,14 μm	1,21 μm	
Typ/Seriennummer	B1 / 36303	B2 / 36343	B3 / 8233	Nickel / 4 μm
Empfindlichkeit	40,3 mV/Pa	52 mV/Pa	8,8 mV/Pa	
Delokalisation (kurz)	2,35 μm	1,57 μm	0,52 μm	
Delokalisation (lang)	2,35 μm	1,57 μm	0,42 μm	
Typ/Seriennummer	C1 / 36311	C2 / 36086	C3 / 36255	Edelstahl / 2 μm
Empfindlichkeit	49,0 mV/Pa	28,7 mV/Pa	42,3 mV/Pa	
Delokalisation (kurz)	3,48 μm	1,80 μm	2,45 μm	
Delokalisation (lang)	3,52 μm	1,87 μm	2,49 μm	

Tabelle 4.2.: Variation der mechanischen Membranspannung sowie des Materials, Übersicht über die Delokalisation der Membranen von MK221-Kapseln bei Anlegen der Polarisationsspannung

Typ	Seriennummer	Speisespannung	Elektrodenabstand	Delokalisation
MK102	322013	200 V	45 μm	3,32 μm
MK102	322013	80 V	45 μm	0,5 μm
MK102	32202	200 V	45 μm	3,32 μm
M296		200 V	53 μm	2,45 μm
M296		80 V	53 μm	0,43 μm
MK221	32218	200 V	27 μm	2,27 μm

Tabelle 4.3.: gemessene Delokalisation der Membranen von MK102-, M296- und MK221-Kapseln

verstärkt er den Effekt der Verbiegung der Membran durch das elektrostatische Feld und macht zusätzlich die Kapsel empfindlicher. Weitere Ergebnisse hierzu finden sich in Kapitel 4.5.

Alle in Abschnitt 4.3 aufgeführten Signale wurden an den Prüflingen angelegt und die resultierende Schwingung gemessen. Ergebnisse finden sich - soweit relevant - im folgenden Abschnitt, bzw. im Anhang C.1.

4.4.2. Flächig

Mit Hilfe von Sinus- und Chirp- Signalen und den TTL-Impulsen des Generators konnte die gesamte Membran der Kapseln gescannt und die resultierende Schwingung anschließend mit Hilfe der FFT und MATLAB visualisiert werden. Ergebnisse der Flächenscans sind 3D-Darstellungen von Membranschwingungen. Diese sind auszugsweise zu sehen im Anhang C.2.

4.4.3. Zeiger-Methode

Bei rotationssymmetrischen, homogenen Membranflächen (i.d.R. Messmikrofone) bot sich außerdem ein Verfahren an, bei dem nur ein "Zeiger" vom Rand zur Mitte der Membran vermessen wurde, da man nach den Voruntersuchungen davon ausgehen kann, dass die Membran gleichmäßig schwingt und ausschließlich Zirkularmoden auftreten. Anschließend können die Messergebnisse der einzelnen Punkte auf diesem Zeiger im Rahmen der Auswertung auf einen virtuellen Kreis im Winkel von 1° um die Mitte rotiert werden (siehe Abbildung 4.7).

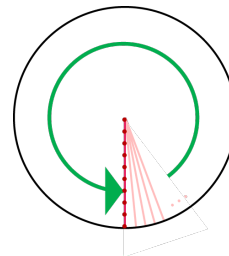


Abbildung 4.7.: entwickeltes Verfahren der Zeigermessung, Rotation um den Mittelpunkt

Dieses Verfahren erlaubt quantitative Aussagen zum Verlauf der Schwingung und eignet sich hervorragend für eine schnelle Schwingungsanalyse, da nur wenige Punkte vermessen werden müssen und die Messung somit in wenigen Minuten erledigt ist. Ein Scan der Oberfläche einer $1/2''$ Kapsel mit 400 Messpunkten dauert ca. 90 Minuten. Bei einer Messung mit einzelnen, reinen Sinustönen würde die Messung jeder einzelnen Frequenz so lange dauern. Das entwickelte Zeigerverfahren benötigt bei einer Anzahl von 20 Messpunkten, die auf 7200 Werte interpoliert werden, eine Messzeit von rund 3 Minuten. Anschließend ist die Schwingung bei allen Frequenzen innerhalb der Chirp-Grenzen in 1 Hz Schritten visualisierbar.

Um einen guten Signal - Rauschabstand zu erreichen, wurde mit Anregungssignalen gearbeitet, deren Pegel i.d.R. bei 2 V_{pp} lag. Wird diese Wechselspannung reziprok in die Kapsel eingekoppelt, entspricht die Amplitude der Membranschwingung einer MK221-Kapsel mit einer Empfindlichkeit von $50 \frac{mV}{Pa}$ einem Schalldruckpegel von 137 dB.

4.5. Auswertungsmethoden

Die Auswertung der Messsignale erfolgte mit Hilfe von Matlab-Routinen. Je nach Anregungssignal und Kapseltyp wurden angepasste Routinen entwickelt. Die Palette reicht von 2D-Bodediagrammen bis hin zu interaktiven Schwingungsvideos bei denen der Betrachter mit Hilfe einer graphischen Benutzeroberfläche die Frequenzen wählen kann und anschließend die resultierende Schwingung der Membran sieht. Die Evaluation von Übertragungsfunktionen aus den einzelnen Messreihen erlaubt die Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungen untereinander und bietet zusätzlich die Möglichkeit der Weiterverwertung der Ergebnisse mittels Faltung auf beliebige Audiosignale. Dies wurde nur exemplarisch durchgeführt, eine Ausarbeitung und eine gezielte Umsetzung nicht weiter verfolgt, ist aber beispielsweise hinsichtlich eines Audio-Plugins möglich und sinnvoll.

4.5.1. Schnelle Fourier-Analyse (FFT)

Die Messungen mit dem Interferometer liefern die Membranbewegung im Zeitbereich. Um Aussagen über den Frequenzbereich zu tätigen, wurden die Messsignale mittels FFT untersucht. Diese zeigt die Reaktionen der Membran im Frequenzbereich. Das Obertonspektrum - soweit vorhanden - wird sichtbar. Nach Überarbeitung der Hochvolt-Verstärkereinheit (vorher EAG von MTG, später Eigenentwicklung im Rahmen des BIM-Projektes, siehe D.1) konnte der Einfluss des Verstärkers auf die reale Schwingung der Membran auf ein Minimum reduziert werden. In der Folge konnte die Schwingung optisch abgetastet und anschließend transformiert werden.

4.5.2. Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion beschreibt die Abhängigkeit des Ausgangssignals eines linearen zeitinvarianten Systems (LTI-System, siehe 4.2) von dessen Eingangssignal im Frequenzbereich. Sie wird definiert als Quotient der transformierten Ausgangsgröße (Y) zur transformierten Eingangsgröße (U) und beschreibt das Eigenverhalten des Übertragungssystems (G) vollständig und unabhängig von den Signalen. Ermöglicht wird damit, das Ausgangssignal des Übertragungssystems aus dem Eingangssignal und der Übertragungsfunktion zu berechnen. Beim vorliegenden LTI-System ist die Gleichung folgendermaßen definiert [76]:

$$G_s := \frac{Y_s}{U_s} \quad (4.6)$$

Konkret angewandt bedeutet dies: Ist das Eingangssignal (Anregungssignal des Frequenzgenerators) sowie das Ergebnis der optischen Abtastung bekannt, kann die Übertragungsfunktion bestimmt werden. Das Ergebnis ist die Kennlinie, mit der das jeweilige Bauteil, in diesem Fall die Mikrofonkapsel, arbeitet. Sie ist das Ergebnis, das das komplexe System Mikrofonkapsel beschreibt.

Die Übertragungsfunktionen wurden bei unterschiedlichen Kapseln mit den genannten Messsignalen (Chirp-, Rechteck- und Burst-Signale) erstellt. Die Ergebnisse finden sich u.a. im Anhang C.1.1.

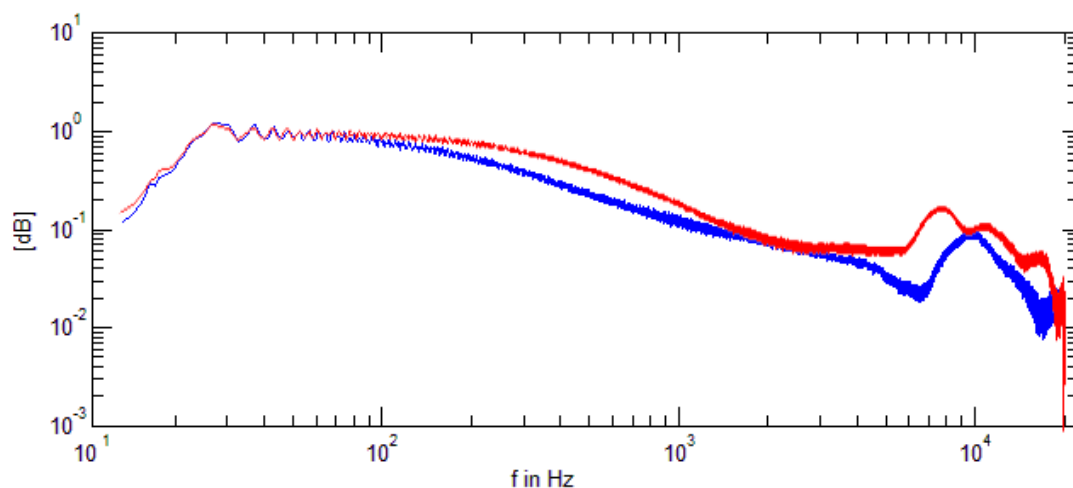


Abbildung 4.8.: Übertragungsfunktion von M70-Kapseln mit Ni-Membran (rot) und PET-Membran (blau), Chirp-Anregung ($20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$), Abtastung in der Membranmitte

Jeder Kapseltyp hat seine eigene Übertragungsfunktion. Innerhalb einer individuellen Kapselserie/Modellreihe sollte diese jedoch möglichst identisch sein. Die Messung und der Vergleich der Übertragungsfunktionen eignet sich beispielsweise zur Qualitätssicherung in der Produktion oder zur Vergleichskalibrierung. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist die Emulation von Kapseltypen. Dazu wird ein beliebiges Signal mit der Übertragungsfunktion eines Kapseltyps systemtheoretisch gefaltet und somit der Klang simuliert, den die Kapsel bei Beschallung mit diesem Signal liefern würde. Damit sind Mikrofonsimulationen und -emulationen möglich.

Wie in 4.6.1 gezeigt wird, kann die Übertragungsfunktion mit jedem beliebigen Eingangssignal erstellt werden - sofern dieses bekannt ist. Das Ausgangssignal war bei allen Prüflingen die optische Abtastung der reziprok angeregten Membranschwingung.

Abbildung 4.8 zeigt zwei Übertragungsfunktionen im Vergleich. Gemessen wurde jeweils ein Chirp-Signal ($20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$) in der Membranmitte von M70-Kapseln. Das Membranmaterial war Nickel (rot) und PET (blau). Abhängig vom Material sind deutliche Unterschiede in der Übertragung zu sehen. Im Bereich von $7 - 8\text{ kHz}$ sind die deutlichsten Abweichungen im Übertragungsverhalten der beiden Membranen zu erkennen. Im Vergleich zu den, vom Hersteller ermittelten Frequenzgängen (siehe Anhang A, Abbildung A.12 und A.13, bei denen sich die Kurven beinahe gleichen), ist das gezeigte Messverfahren in der Lage, im Hörtest ermittelte Unterschiede objektiv abzubilden.

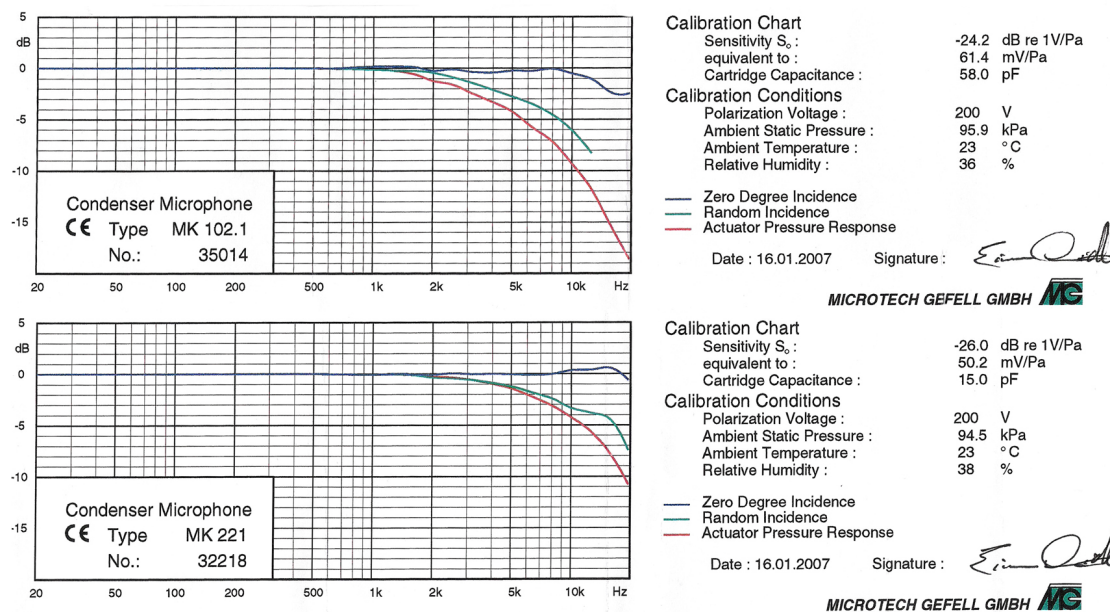


Abbildung 4.9.: Calibration Chart Microtech Gefell, MK102.1 und MK221

4.6. Ergebnisse der optischen Messungen

4.6.1. Visualisierung der punktuellen Messungen

Amplituden- Frequenzgänge Um einen Vergleich zu den vom Hersteller elektrisch gemessenen Amplituden- Frequenzgängen (siehe Abbildung 4.9) zu bekommen, wurde von einigen Messmikrofon-Kapseln der Verlauf der Membranschwingung bei einer Anregung mit Hilfe von Sinus-Tönen bei unterschiedlichen Frequenzen optisch vermessen. Die laser-optische Messung liefert Aussagen über die Amplitude und den tatsächlichen Verlauf der Membranschwingung. Die Kurve “Actuator Pressure Response” in den gezeigten Calibration Charts der Kapseln ist eine aus dem elektrischen Signal von “Zero Degree Incidence” (also dem Frontaleinfall - der tatsächlich gemessenen Größe) berechneten Kurve.

Zur besseren Vergleichbarkeit der ähnlichen Kapseln M296 und MK102 wurden beide mit 80 V Polarisierungsspannung betrieben. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Zu erkennen ist die bessere Übertragung des Hochtonbereiches bei der M296. Grund hierfür ist eine im Vergleich zur MK102 geringere mechanische Vorspannung der Membran. Außerdem wirkt durch den um ca. 8 μm größeren Elektrodenabstand ein geringeres elektrostatisches Feld, das die Membran weniger stark in Richtung der Gegenelektrode verbiegt und somit in diese Richtung eine Kraft auf die Membran ausübt. Die Membran kann schlichtweg freier schwingen, das Mikrofon ist empfindlicher. Dieser Umstand macht sich vor allem bei hohen Frequenzen bemerkbar. Entsprechend größer ist auch die Anfälligkeit gegen Störschall, was in Abbildung 4.10 ab 10 kHz auch deutlich zu erkennen ist.

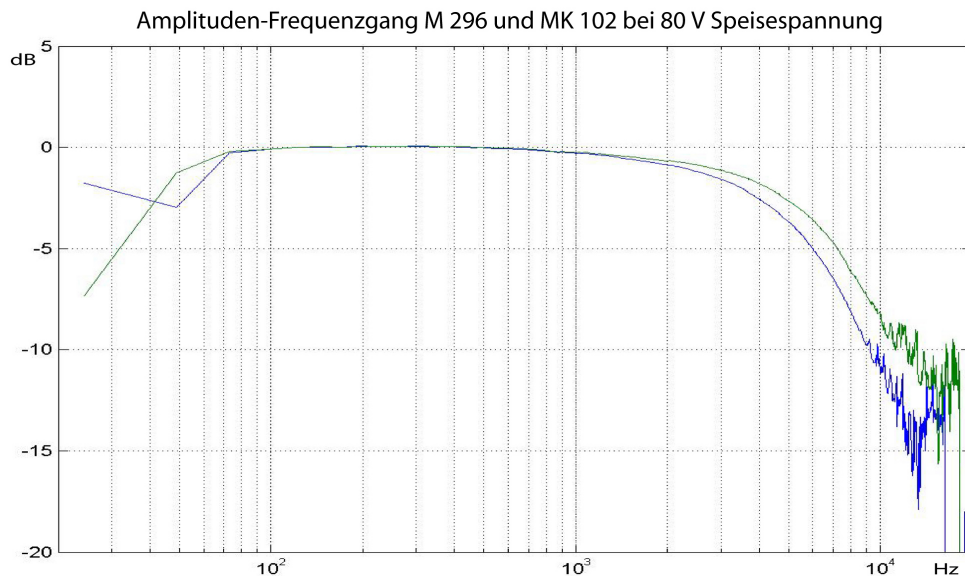


Abbildung 4.10.: Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von M296 (grün) und MK102 (blau)

Aussagen über die Toleranz innerhalb des Produktionsprozesses lassen sich durch Gegenvergleiche mit Rückstellmustern realisieren (siehe Abbildung 4.11). Bei dieser Messung wurden exemplarisch zwei baugleiche Kapseln gegenübergestellt. Zwischen den Produktionsdaten der beiden gezeigten Modelle liegen mehrere Jahre. Decken sich die beiden Kurven, verhalten sich die Kapseln entsprechend absolut identisch. Im gezeigten Verlauf ist eine leichte Toleranz erkennbar. Diese ist allerdings so gering, dass sie mit herkömmlichen Kalibriermethoden nicht messbar, ihr Einfluss daher eher vernachlässigbar ist und sich entsprechend in der Übertragung nicht niederschlägt. Allerdings zeigt es auch, dass die optische Kalibrierung durchaus eine sinnvolle und äußerst genaue Messung darstellt.

Beim direkten Vergleich der Amplituden- Frequenzgänge von 1/2"- und 1"- Kapseln, wie in Abbildung 4.12 gezeigt, ist gut zu erkennen, dass der Übertragungsbereich der MK221 in den oberen Frequenzbereichen deutlich weiter verläuft, der Wandler also eine größere Bandbreite bietet. In der Gegenüberstellung der beiden Messergebnisse ist die Abhängigkeit des Übertragungsbereiches von der Membranmasse bei gleicher elektrischer Vorspannung gut zu erkennen. Die Schwingungsamplitude ist über den unteren bis mittleren Frequenzbereich bei halbem Membrandurchmesser (jedoch auch ca. halbem Elektrodenabstand) annähernd gleich. Für hohe Frequenzen gilt, dass eine kleine Membran mit hoher mechanischer Spannung einen großen Übertragungsbereich liefert. Neben der mechanischen Komponente ist eine weitere denkbare Ursache das geringere elektrostatische Feld (durch den halben Membrandurchmesser im Vergleich um ca. $\frac{1}{4}$ kleiner). Dieses wird durch den halben Elektrodenabstand nur ungenügend kompensiert. Das resultierende Feld ist rechnerisch ca. halb so groß wie das der MK102. Entsprechend weniger stark wird die mechanische Schwingung der Membran beeinflusst. Dieser Umstand

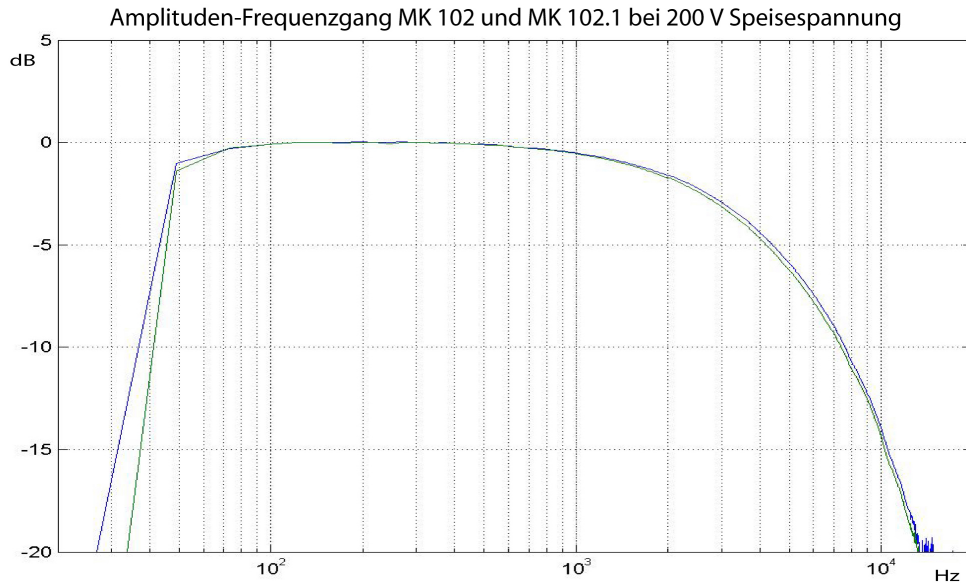


Abbildung 4.11.: Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von MK102.1 (grün) und MK102 (blau)

macht sich vor allem bei hohen Frequenzen bemerkbar. Hier sind die Amplituden der Luftmolekülschwingungen im Vergleich zu denen bei tiefen Frequenzen ohnehin geringer.

In der Praxis seit Jahrzehnten üblich und verbreitet ist die Messung des Amplituden-Frequenzgangs. Diese Messung erfolgt im schalltoten Raum bei einer Reihe von Sinus-Frequenzen. Was hierbei allerdings aufgezeichnet und gemessen wird, ist das elektrische Signal des Wandlers im eingeschwungenen Zustand. Die gemessenen Kurven stellen eine gute Unterscheidungsmöglichkeit von verschiedenen Mikrofonen dar, lassen allerdings nur lückenhaft Aussagen über den tatsächlichen Klang des jeweiligen Mikrofons bzw. die tatsächliche Wandlung zu. In der Realität wandeln Mikrofone Schallwellen, die in aller Regel keine Sinusschwingungen darstellen. Zusätzlich wird die Phase des Einschwingvorgangs nicht in die Erstellung der Messprotokolle mit aufgenommen. Dies wäre zukünftig ein weiteres, sinnvolles Unterscheidungskriterium. Daneben könnte die Übertragungsfunktion der Wandler ermittelt und in die Messprotokolle mit aufgenommen werden. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass diese eine weitaus bessere Näherung an das Klangverhalten der Mikrofone darstellt, als die bloße Ermittlung der Amplituden-Frequenzgänge.

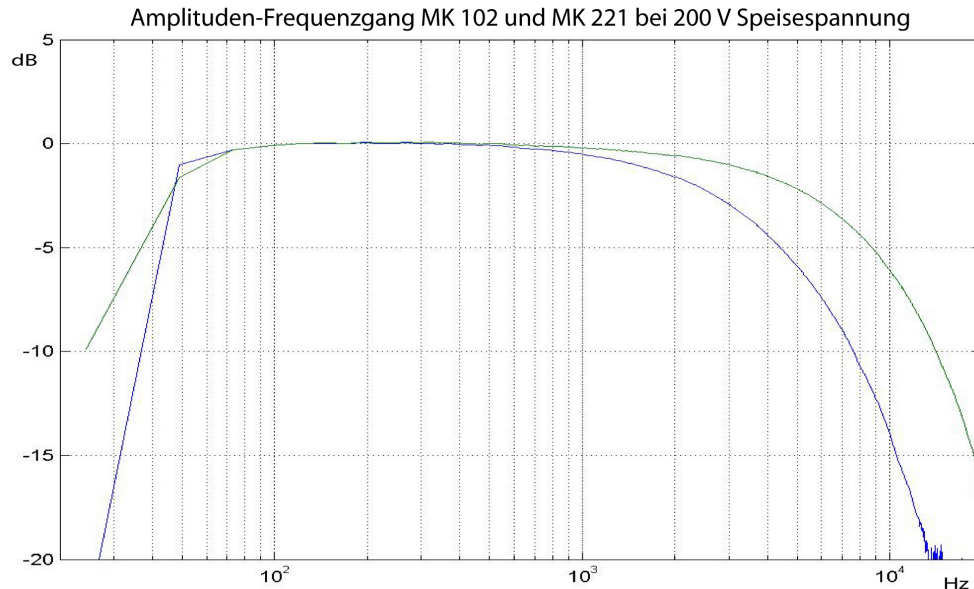


Abbildung 4.12.: Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von MK221 (grün) und MK102 (blau)

Sinus Die punktuelle Untersuchung von Sinus-Signalen bei den verschiedenen Prüflingen ergab die folgenden Ergebnisse:

Abbildung 4.13 zeigt die FFT der unterschiedlichen Kapseln bei einer Anregungsfrequenz von $6,5 \text{ kHz}$. Die Schwingungsamplituden der Membranen unterscheiden sich zwar, dies ist jedoch auf unterschiedliche Elektrodenabstände zurückzuführen und trägt nichts Maßgebliches zu den Ergebnissen bei (letztendlich zeigt es nur, dass die Kapseln unterschiedliche Empfindlichkeiten aufweisen). Jedoch ist zu beachten, dass bei der Dreiecks- und MK221-Kapsel der Maßstab in der Darstellung so gewählt wurde, dass jeweils die 2. und 3. Harmonische zu sehen sind, die auch im Text beschrieben sind. Diese tauchen bei der ELMC und M71-Kapsel jedoch auch bei erheblich kleinerem Maßstab nicht auf. Daher sind bei diesen Prüflingen die absoluten Amplituden in der Abbildung ablesbar. Die Amplitudenverhältnisse sind im Folgenden genannt.

Die Ausbildung der Harmonischen ist bei den jeweiligen Kapseln eklatant unterschiedlich. Während bei der rechteckigen Pearl-Kapsel die Anrege-Frequenz (Sinus, $2 V_{pp}$) eine resultierende Schwingung von 20 nm zeigt, tritt die 1. Harmonische mit 240 pm (Verhältnis 1:83,3) klar in den Hintergrund. Die klassische M71 Großmembran-Kapsel zeigt die 1. Harmonische mit deutlich höherer Amplitude (6 nm bei $6,5 \text{ kHz}$, 390 pm bei 13 kHz , Verhältnis 1:15,4). Die Metallmembran der Dreiecks-Kapsel reagiert auch auf weitere Harmonische: 18 nm bei $6,5 \text{ kHz}$, 550 pm bei 13 kHz , Verhältnis 1:32,7; 50 pm bei $19,5$, Verhältnis 1:360 und die 3. Harmonische mit 30 pm bei 26 kHz , Verhältnis 1:600). Ähnlich verhält sich die Membran der MK221 mit 48 nm Amplitude bei $6,5 \text{ kHz}$, $3,9 \text{ nm}$ bei 13 kHz , Verhältnis 1:12,3 und jeweils 260 pm bei $19,5$ bzw. 26 kHz , Verhältnis 1:184. Dieser Umstand soll später unter Bezugnahme auf die Ergebnisse der Hörtests noch ge-

nauer betrachtet werden. Er lässt darauf schließen, dass reine Metallmembranen doch nicht unerheblichen Einfluss auf das zu wandelnde Signal nehmen, was psychoakustisch Einfluss auf den Klang des Systems nimmt. Kommen zu den gezeigten harmonischen Obertönen in der akustischen Weiterverarbeitung noch Einflüsse verschiedener Verstärkerschaltungen hinzu, wird der Effekt u.U. nochmals verstärkt.

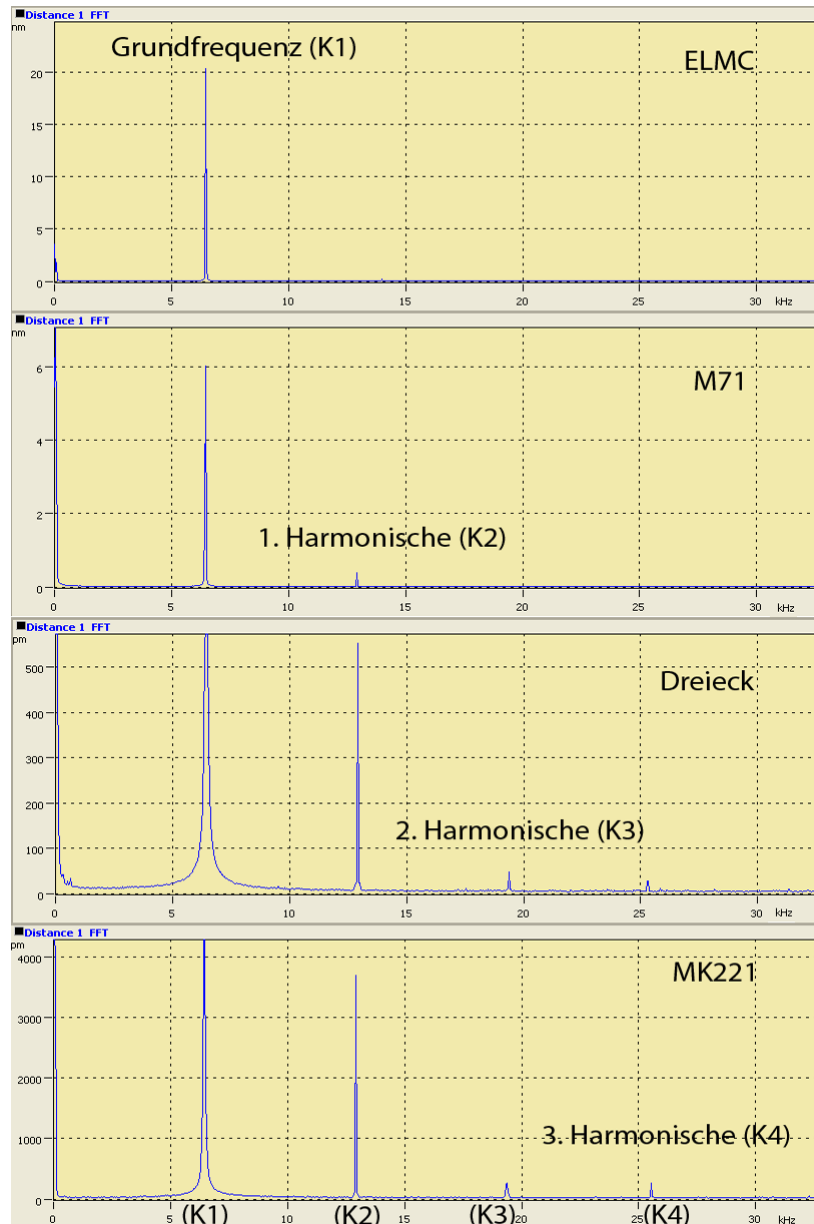


Abbildung 4.13.: FFT bei 6,5 kHz, ELMC, M71, Dreieck, MK221 (von oben nach unten), Auftreten der Harmonischen (K2-4), Hinweis: bei Dreieck und MK221 ist die Y-Achse gezoomt

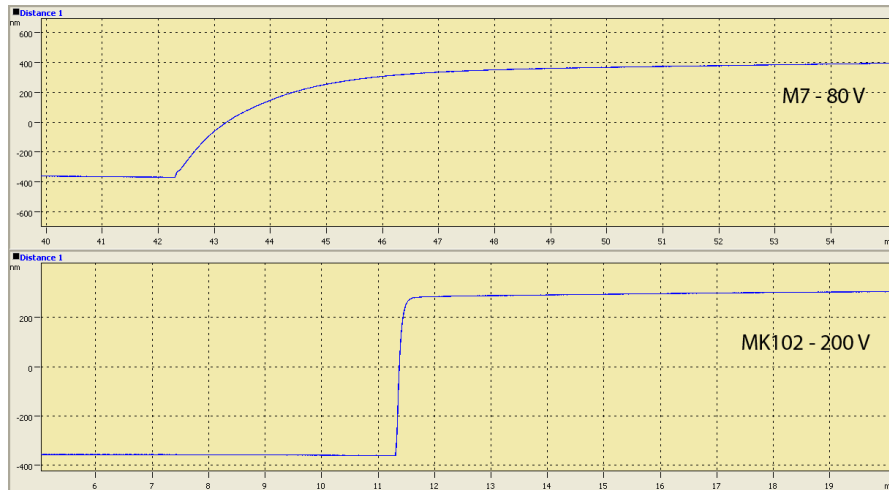


Abbildung 4.14.: Vergleich von M7-Kapsel (oben, Polarisationsspannung 80 V) und MK102-Kapsel (unten, Polarisationsspannung 200 V) bei +2 V Burst-Anregung, Abtastung in der Membranmitte

Rechteck/Burst Mittels Frequenzgenerator wurde eine Rechteck- ($2 V_{pp}$), bzw. ein Burst-Signal (+2 V) auf die Kapseln gegeben. Bei den Messungen fiel auf, dass mechanisch stark gespannte Metallmembranen (von Messmikrofonen) dem Anregungssignal äußerst schnell und umfänglich folgen, die Bandbreite der Wandler somit im Vergleich zu den mechanisch deutlich weniger stark gespannten Kunststoffmembranen (bei Studiomikrofonen) wesentlich größer ist. Dies ist gut zu sehen in Abbildung 4.14. Die goldbeschichtete PET-Membran der M7-Kapsel (Großmembran) schwingt zwar mit größerer Amplitude (entspricht einer höheren Empfindlichkeit), jedoch ist sie kaum in der Lage, dem Anregungssignal exakt zu folgen. Die Ni-Membran der MK102-Kapsel (Abbildung 4.14, unten) hingegen folgt dem Impuls im Vergleich sprunghaft. Zum Einen sind Membranen bei Druckgradientenempfängern im Vergleich zu denen der Messmikrofone kaum mechanisch vorgespannt, zum Anderen ist die Polarisationsspannung mit 80 V deutlich geringer. Die Kraft des elektrostatischen Feldes wirkt somit weniger stark an der Membran.

Zeitliche Verschiebungen in den gezeigten Abbildungen (X-Achse) haben generell keinen Einfluss auf die Messung. Lediglich die relative Dauer der Anstiegsflanke und die Amplitude der Membranauslenkungen (Y-Achse) spiegeln Eigenschaften der jeweiligen Kapselanordnung wieder.

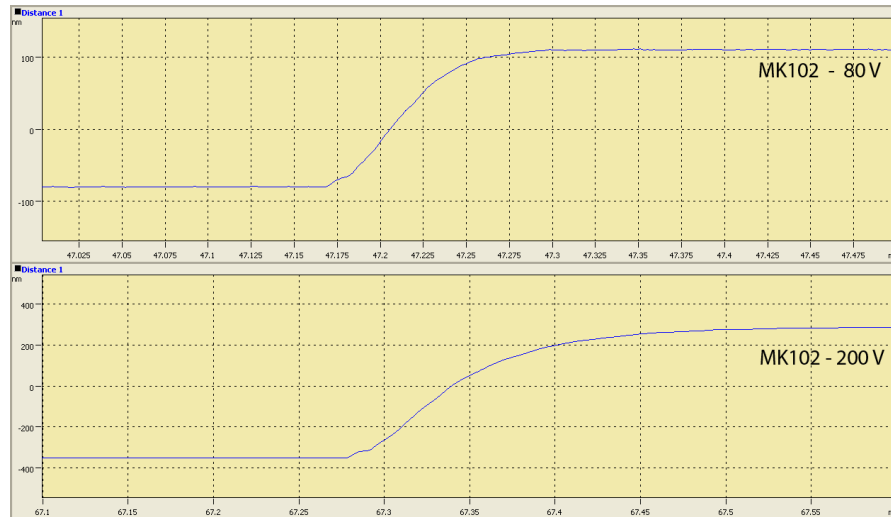


Abbildung 4.15.: MK102, Burst-Anregung $+2\text{ V}$, 80 V Speisespannung (oben), 200 V (unten), Abtastung in der Membranmitte

Bei geringerer Polarisationsspannung (80 V im Vergleich zu 200 V) beim MK102 folgt die Membran dem Anregungssignal schneller (siehe Abbildung 4.15, oben). Zusätzlich ist der Übergang zur Sättigung nicht so sehr gerundet. Das bedeutet, dass die Bandbreite des Systems entsprechend größer ist. Dieser Umstand lässt sich bereits aus den Amplituden-Frequenzgängen erkennen. Er ist darauf zurückzuführen, dass das geringere elektrostatische Feld die Membran nicht so stark in Richtung der Gegenelektrode zieht und im Verlauf weniger Einfluss auf die Schwingung nehmen kann, diese entsprechend weniger dämpft, die Membran somit freier schwingt. Entsprechend höher ist die Empfindlichkeit des Wandlers. Wie in Abbildung 4.15 zu sehen, ist die Schwingungsamplitude bei einer MK102-Kapsel mit ca. 190 nm bei 80 V Speisespannung und einer Burst-Anregung von $+2\text{ V}$ jedoch auch deutlich geringer im Vergleich zu ca. 470 nm bei 200 V Speisespannung. Das kann damit erklärt werden, dass durch die höhere elektrische Spannung ein größeres elektrostatisches Feld entsteht und die Membran stärker in Richtung der Gegenelektrode durchgebogen wird. Bei reziproker Anregung ist daher die Kraft, die die Membran in Schwingung versetzt, größer. Entsprechend größer ist auch die Amplitude der daraus resultierenden Bewegung.

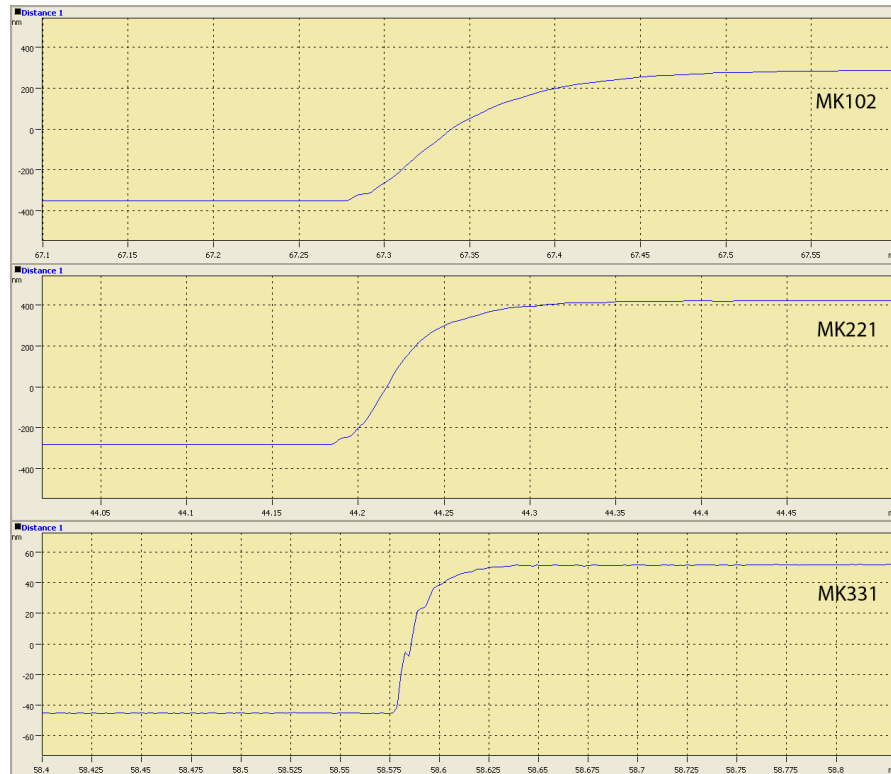


Abbildung 4.16.: MK102 (oben), MK221 (Mitte), MK301 (unten) bei +2 V Burst-Anregung

Vergleicht man unterschiedliche Membrandurchmesser (MK102 1", MK221 1/2", MK301 1/4") und der damit geringeren Membranmasse, fällt auf, dass mit abnehmender Masse die Impulstreue und Bandbreite wächst. Im direkten Vergleich der Kapseln (siehe Abbildung 4.16) ist gut zu erkennen, dass die Flanke steiler ist, je kleiner Membrandurchmesser und entsprechend deren Masse ist. Die Membran folgt dem Anregungssignal treuer, die Bandbreite des Kapselsystems ist auch hier entsprechend größer. Dies lässt sich bereits aus den Amplituden- Frequenzgängen des Herstellers ablesen (siehe Abschnitt 4.6.1, Abbildung 4.9, und A.2). Den Anschwingvorgang selbst oder Aussagen über diesen allerdings findet man in den Datenblättern nicht. Umso interessanter ist es, die Schwingung in einer zeitlichen Auflösung von ca. 0,5 ms zu betrachten (siehe Abbildung 4.16). Bemerkenswert ist vor allem die Systemantwort der MK301-Kapsel, die innerhalb von 0,05 ms von 0% auf 100% förmlich "springt". Die ähnliche Amplitude von MK102 und MK221 (1" und 1/2"-Kapseln) lässt sich durch den, beim MK221 um die Hälfte reduzierten Elektrodenabstand erklären (siehe Tabelle 4.3, 45 μm im Vergleich zu 27 μm). Dieser hat - trotz der geringeren Membranfläche des MK221 - eine ähnlich große elektrostatische Kraft zur Folge.

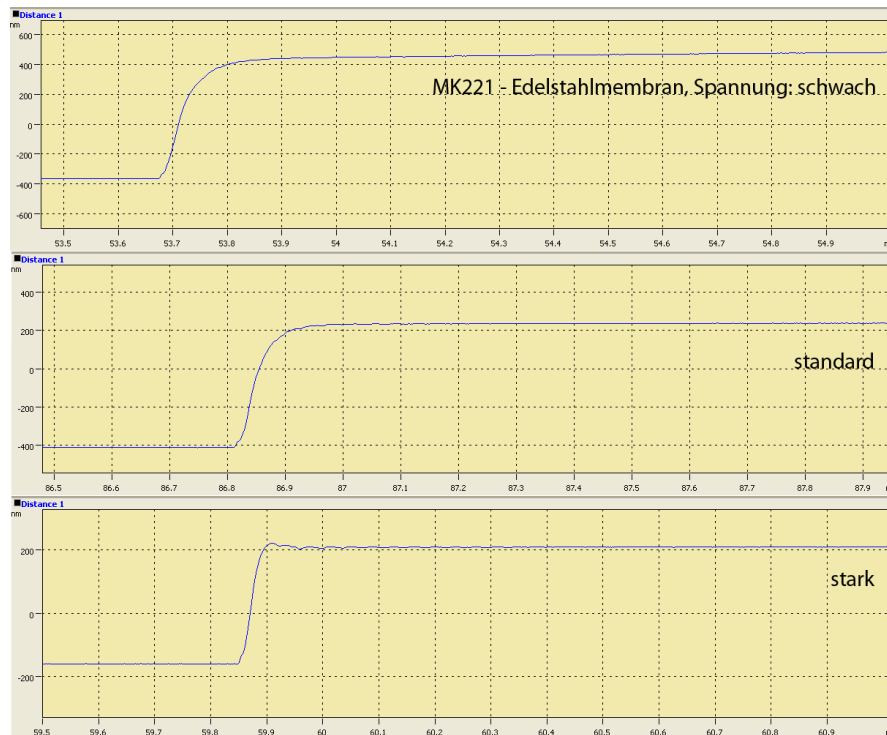


Abbildung 4.17.: MK221 mit unterschiedlich stark gespannter $2\text{ }\mu\text{m}$ - Edelstahlmembran, C1 schwach (oben), C2 mittel (Mitte), C3 stark (unten) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung

In Abbildung 4.17 sind 3 Kapseln mit $2\text{ }\mu\text{m}$ dicker Edelstahlmembran zu sehen, die jeweils unterschiedlich stark mechanisch gespannt sind (von oben nach unten zunehmend). Es fällt auf, dass die Flanke mit zunehmender Spannung steiler wird, somit die Bandbreite der Kapsel ansteigt. Durch die stärkere Membranspannung kann sich diese nicht mehr so stark in Richtung der Gegenelektrode durchbiegen. Das elektrostatisch wirkende Feld wird dadurch entsprechend kleiner, somit auch die Schwingungsamplitude bei reziproker Anregung. Bei der stark gespannten Membran fällt neben der steileren Flanke das Überspringen auf. Das bedeutet, dass die Kapsel in eigener Resonanzfrequenz nachschwingt. Die beiden im Verhältnis geringer gespannten Membranen der anderen Kapseln folgen dem Impuls zwar weniger schnell, dafür jedoch ohne Resonanz. Die höhere Empfindlichkeit der geringer gespannten Membran ist an der jeweils größeren Schwingungsamplitude ablesbar.

Die Ergebnisse bezüglich der Bandbreite ließen sich auch durch andere Untersuchungen bestätigen. So konnten beispielsweise bei reziproker Anregung einer MK221-Kapsel ($1/2''$ Messmikrofon) Schwingungen bei Frequenzen von bis zu 300 kHz gemessen werden. Die übertragbare Bandbreite einer $1/4''$ Messmikrofonkapsel liegt noch deutlich darüber, wohingegen die klassische M7-Kapsel bereits bei Frequenzen im Bereich von 16 kHz deutliche Einbrüche in der Amplitude zeigt.

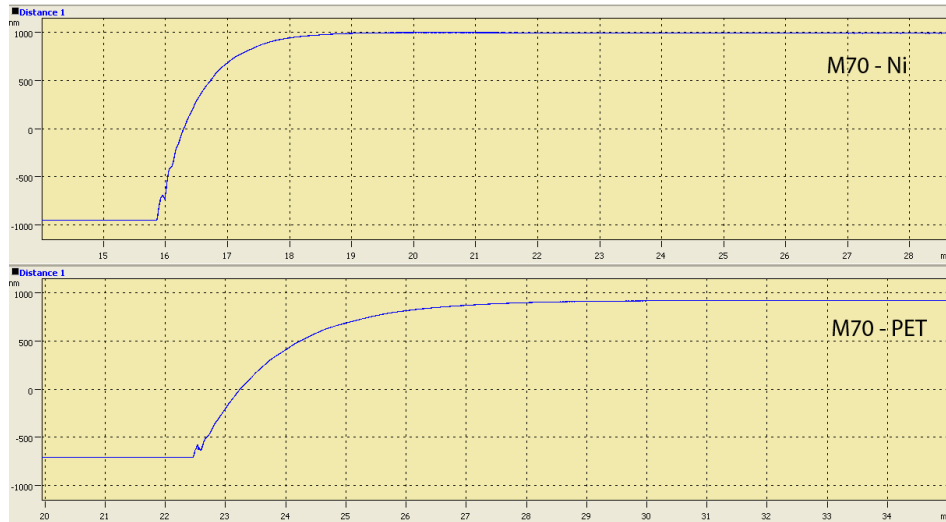
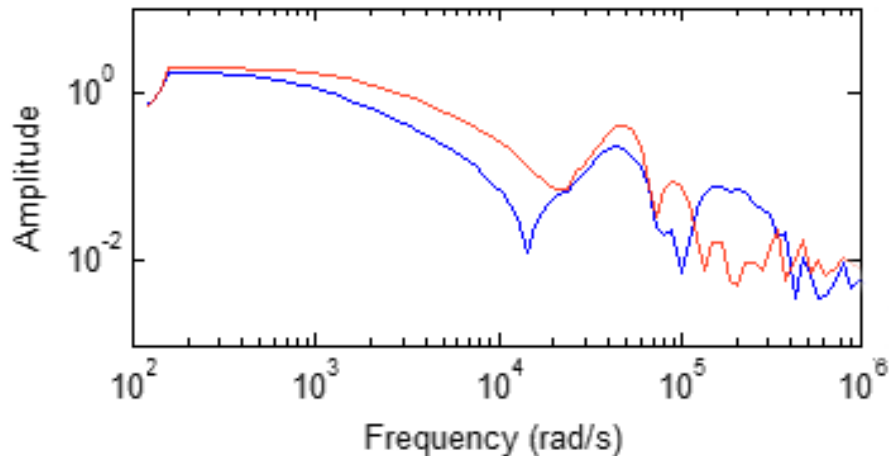


Abbildung 4.18.: M70-Kapsel, Membranmaterial Nickel (oben), goldbeschichtetes PET (unten) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung

Besonders interessant ist die Gegenüberstellung von generell unterschiedlichen Membranmaterialien bei sonst gleichen Konstruktionsparametern (siehe Abbildung 4.18). Hier wurden zwei M70 Kleinmembran - Kapseln im Hause MTG mit unterschiedlichen Membranmaterialien bestückt. Während die Nickelmembran innerhalb von ca. 3 ms den Maximalpegel erreicht, dauert das Anschwingen bei der goldbeschichteten PET-Membran ca. $7,5\text{ ms}$. Dieser Umstand spiegelt sich in keinem der gemessenen Amplituden- Frequenzgänge nieder (vgl. A.12 und A.13 im Anhang). Die Unregelmäßigkeit in der Anstiegsflanke muss ihre Ursachen in der Gestaltung der Gegenelektrode, bzw. der Luftzirkulation in der Kapsel haben, da sie unabhängig vom Membranmaterial in ähnlicher Ausprägung bei beiden Kapseln auftritt.

Bei der Betrachtung der Amplituden- Frequenzgänge (siehe Abbildung 4.19), die aus den Übertragungsfunktionen erstellt wurden, wird sichtbar, dass die PET-Membran bei der Übertragung von hohen Frequenzen (ca. $10,5\text{ kHz}$) im Vergleich zur Ni-Membran früher und stärker einbricht, jedoch anschließend annähernd wieder die gleiche Amplitude erreicht. Dieser Umstand zeigt, dass die im Hörtest ermittelten klanglichen Unterschiede vor allem von Metall- zu Kunststoffmembranen durchaus messbar sind, allerdings nicht mit althergebrachten Methoden. Entsprechend sind die Unterschiede im Verlauf der traditionell gemessenen Amplituden- Frequenzgänge des Herstellers, siehe Anhang A.12 und A.13, kaum zu sehen.



Abbildungung 4.19.: Amplituden- Frequenzgang der M70-Kapsel mit Ni-Membran (rot) und goldbeschichteter PET-Membran (blau), Anregungssignal Burst +2 V, Abtastung in der Membranmitte

4.6.2. 3D-Visualisierung der Schwingungen

Ein Teil der Arbeit ist die 3D-Darstellung von Membranschwingungen. Die Ergebnisse bei unterschiedlichen Anregungssignalen finden sich im Folgenden:

Scans mit Sinus-Signalen Mit Hilfe von Sinus-Signalen konnten bei den Flächenscans auf den Messmikrofonkapseln Zirkularmoden bis zur 2. Ordnung gemessen und visualisiert werden. Abweichungen und Unterschiede in der Schwingungsamplitude (Y-Achse) bei den Abbildungen 4.20, 4.21 und 4.22 sind darauf zurückzuführen, dass die Schwingungsamplitude der Luftteilchen zu höheren Frequenzen hin abnimmt. Die Membran muss bei linearem Schwingungsverhalten entsprechend auch eine geringere Amplitude zeigen. Die Skalen in den folgenden Abbildungen sind derart angepasst, dass die Schwingung gut zu sehen ist.

Abbildungung 4.20 zeigt im Vergleich zweier fast baugleicher Kapseln (M296 und MK102) bei gleichem Anregungssignal die Amplitudenverteilung auf der Membran in 2D. Hier ist gut zu erkennen, wie sich eine niedrigere Speisespannung (80 V im Vergleich zu 200 V) auf die Schwingungsamplitude und die Ausprägung der Wölbung der Membran auswirkt.

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass sich die Membran kolbenförmig bewegt [136]. Dies ist allerdings nur eine modellhafte Vorstellung, um mögliche Berechnungen zu erleichtern. Bei der Visualisierung der Schwingungen (vgl. Abbildung 4.20) fällt auf, dass sich die Membran eher glockenförmig über der Gegenelektrode bewegt - je nach Stärke der elektrischen und mechanischen Vorspannung von Feld und Membran. Aus der Messung der Amplituden- Frequenzgänge ist bekannt, dass die maximale Auslenkung der Membran bis zu einer bestimmten Frequenz absolut linear verläuft. Durch den geringeren Abstand der Membranmitte zur Gegenelektrode im Vergleich zum Rand der Membran hat dieser Bereich einen deutlich größeren Einfluss auf das resultierende elektrische Signal.

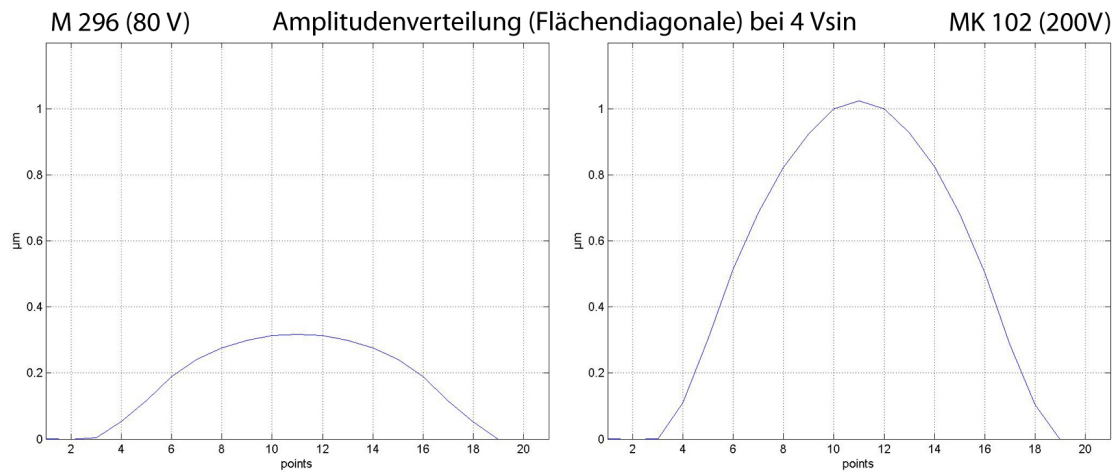


Abbildung 4.20.: Amplitudenverteilung M296 und MK102 mit individueller Speisespannung bei $\sin 1 \text{ kHz}$, $4 V_{pp}$, glockenförmige Schwingung

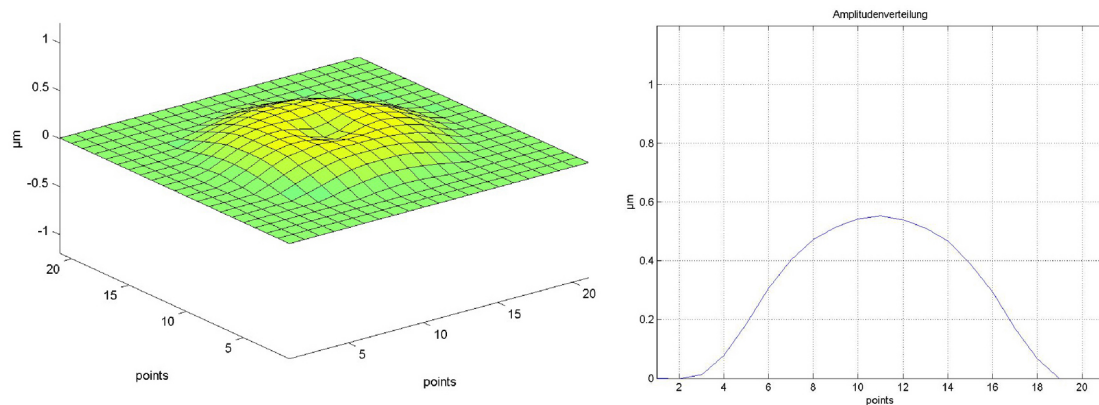


Abbildung 4.21.: links: Ausbildung der ersten Mode bei MK102, rechts: Flächendiagonale, Signal: $\sin 1 \text{ kHz}$, $4 V_{pp}$

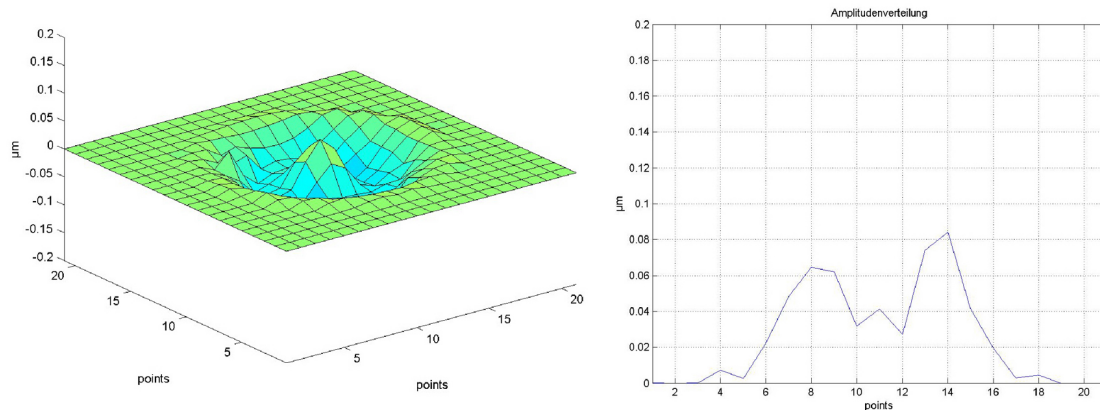


Abbildung 4.22.: links: Ausbildung der zweiten Mode bei MK102, rechts: Flächendiagonale, Signal: $\sin 22.5 \text{ kHz}$, $4 V_{pp}$

Betrachtet man das Auftreten der Moden, ist festzustellen, dass sich die erste zirkuläre Mode in einem Frequenzbereich von $500 - 1000 \text{ Hz}$ ausbildet - abhängig von der mechanischen und elektrischen Vorspannung (siehe Abbildung 4.21). Die zweite Mode liegt bereits außerhalb des hörbaren Bereiches bei 22.5 kHz (siehe Abbildung 4.22). Vergleiche zwischen 1"- und 1/2"-Kapseln bei den Frequenzen, bei denen sich die Moden ausbilden, zeigen, dass die Kapseln derart optimiert wurden, dass sich die Schwingungen sehr ähneln. Dies ist der Fall sowohl in der Amplitude, als auch bei den Frequenzen, bei denen sich die Moden auszubilden beginnen. Lediglich im Bereich über 20 kHz sind deutliche Unterschiede der Schwingungen bei unterschiedlichen Membrandurchmessern zu sehen. So schwingt die Mitte der MK221 bei 25 kHz gegenphasig zum Rand. Die Membran einer MK102 hingegen kann der Schwingung nicht mehr folgen. Es schwingt lediglich der Randbereich, die Membranmitte hingegen verharrt in ihrer Position. Eine mögliche Erklärung ist die Masseträgheit der im Vergleich um ca. $\frac{3}{4}$ kleineren Membranfläche der 1/2"-Kapsel ($226,98 \text{ mm}^2$ Membranfläche bei MK102, $56,75 \text{ mm}^2$ bei MK221). Bezüglich der Ausbildung von höheren Schwingungsmoden lässt sich sagen, dass diese umso weniger ausgeprägt sind und erst bei höheren Frequenzen und Amplituden auftreten, je stärker die mechanische Vorspannung ist.

Der Verlauf der Membranschwingung einer MK102-Kapsel über den Übertragungsbereich von 20 Hz bis 25 kHz ist dargestellt im Anhang C.2, Abbildung C.8 und Folgende.

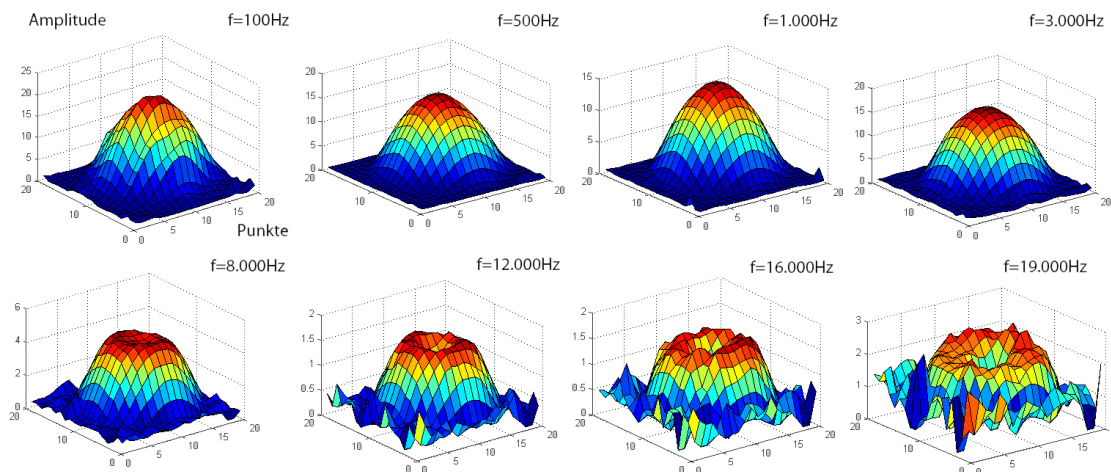


Abbildung 4.23.: Darstellung der Schwingungsmaxima (rot) einer MK221 bei jeweils einer Frequenz, Anregung: Chirp-Signal $2 V_{pp}$, Flächenscan

Scans mit Chirp-Signalen Wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, wurde die Membran mit exponentiellen Chirp-Signalen zum Schwingen gebracht und punktwise abgetastet. Die Ergebnisse lassen sich mit Hilfe der FFT und Matlab in einer schwingenden Fläche visualisieren, die eindeutige Aussagen über die Bewegung bei bestimmten Frequenzen zulässt. Mit Hilfe der Auswerte-Routinen lassen sich die auftretenden Moden visualisieren und qualitative Aussagen über die unterschiedlichen Kapseltypen und deren Eigenheiten treffen. Die im Flächenscan mittels Chirp-Signalen gemessene Schwingung ist zu sehen in Abbildung 4.23. Auch hier ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Schwingungsamplituden zum Einen aus einer Abnahme der Molekülschwingungen hin zu höheren Frequenzen resultieren, zum Anderen wirkt sich die Breite der Fensterung der FFT bei der Auswertung auf die gezeigten Schwingungsamplituden aus. Wie in Abschnitt 4.6.1 dargestellt, verhält sich das Mikrofon jedoch im gezeigten Frequenzbereich linear.

Zusätzlich wurden auch die Messungen mit der Zeigermethode visualisiert. Wie die Schwingung bewertet werden kann, zeigt Abbildung 4.24. Im Vergleich mit der Darstellung des Flächenscans (vgl. Abbildung 4.23), bei dem insgesamt 200 Punkte auf der Membran abgetastet wurden, sind Verlauf der Schwingung, Amplitude und Ausbildung der Moden bereits mit 5 Messpunkten vollständig sichtbar.

Mit Hilfe dieser Verfahren sind eindeutige Vergleiche der Schwingungsformen unterschiedlicher Kapseltypen möglich.

Festzustellen ist, dass auf stark gespannten Membranen (der Druckempfänger) im Hörbereich¹³ zirkuläre Moden der ersten bis dritten Ordnung entstehen. Bei den untersuchten Druckgradientenempfängern schwingt die im Vergleich locker gespannte Membran leichter und verbiegt sich stärker.

Allerdings konnten mit Hilfe der reziproken Schwingungsanregung bei allen untersuch-

¹³20 Hz - 20 kHz

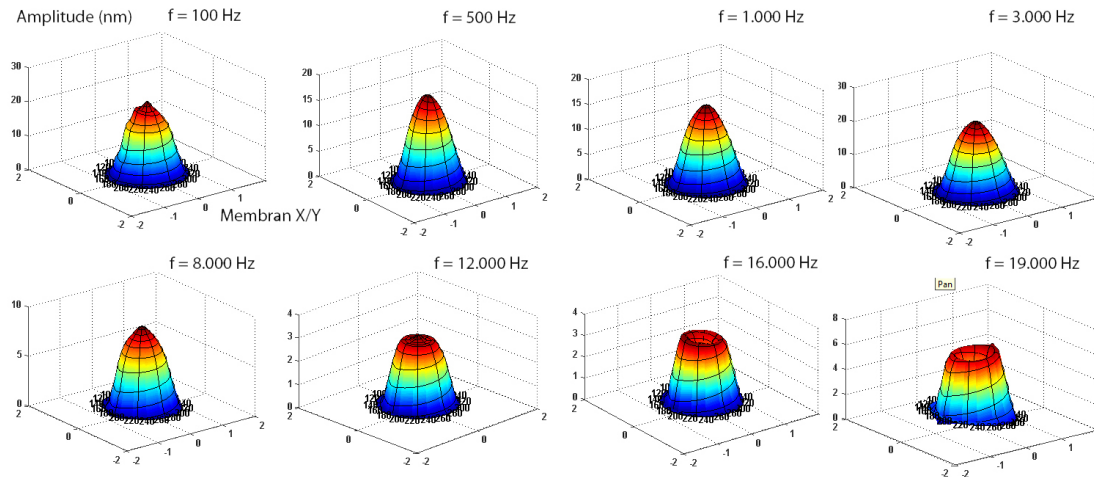


Abbildung 4.24.: Darstellung der Schwingungsmaxima (rot) einer MK221 bei jeweils einer Frequenz, Zeigerscan, Anregung: Chirp-Signal $2 V_{pp}$, Auswertung nach der Zeigermethode

ten Kapseln lediglich zirkuläre Moden nachgewiesen werden. Ein direkter Einfluss der Modenbildung auf den Klang konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Jedoch besteht ein Zusammenhang der Modenbildung zum Phasengang der Kapseln, da sich die Phase mit Entstehen der zweiten Zirkularmode um 180° dreht (bei Messung in der Membranmitte - die aufgrund der Nähe zur Gegenelektrode den größten Einfluss auf das resultierende Gesamtsignal zu nehmen scheint). Bei einer MK221 tritt diese bei ca. $22,5 \text{ kHz}$ auf. Dies ist zu sehen in Abbildung 4.22. Der Effekt der Phasendrehung mag klangliche bzw. psychoakustische Auswirkungen haben. Diese konnten allerdings im Verlauf der Arbeit nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Es ist zu erwarten, dass bei einer Schwingungsanregung mittels Luftschall auch die Ausbildung von radialen Moden zu sehen ist. Bei einer seitlichen Schalleinkopplung (bspw. 45°) wirkt das elektrostatische Feld in Form der Polarisationsspannung auf die komplette Membran. Die Schwingungsanregung erfolgt dann jedoch nicht mehr gleichmäßig in Form des Feldes (wie bei der Reziprozitätsmethode, vgl. Abschnitt 2.3), sondern durch die gerichtete Luftmolekülschwingung. Diese Untersuchungen sind allerdings nicht mehr Teil der vorliegenden Arbeit.



Abbildung 4.26.: Schablone für die Bedampfung der segmentierten Membranen mit dickerer Goldschicht im Winkel von 10°, 20°, 40°, 90° von MTG

Segmentierte Membranen Aus der Biomedizin ist bekannt, dass das menschliche Trommelfell keine homogene Fläche darstellt, sondern ein dickeres Teilstück an der Stelle besitzt, an der der Hammer ansetzt [4]. Eine Betrachtung der Trommelfellschwingung zeigt, dass eine derart gestörte Fläche keine zirkularen Moden ausbildet, sondern lediglich radiale. Um dies in der Praxis nachzuweisen und zu untersuchen, wurden Prüflinge entwickelt und gebaut, deren Membranen Störungen in unterschiedlichen Dimensionen aufweisen.

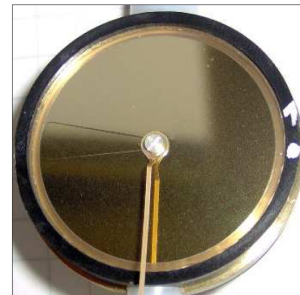


Abbildung 4.25.: Membran mit 10°-Sektor, MTG

Diese Modifikation erfolgte bei M7-Kapseln im Hause MTG in Form einer dickeren Goldbeschichtung eines Kreissektors der Membran, siehe 4.25.

Die Größe des Kreissektors variiert im Bereich von 10°, 20°, 40° und 90° (siehe Abbildung 4.26). Amplituden- Frequenzgangsmessungen finden sich im Anhang D.4, Abbildungen D.23, D.24, D.25 und D.26.

Aufgrund der Reziprozitätsmethode zur Schwingungsanregung, bei der die Kraft auf alle Teile der Membran gleichmäßig wirkt, konnten jedoch keine Abweichungen der Schwingung im Vergleich zu homogenen Flächen nachgewiesen werden. Die Membran schwingt bei reziproker Anregung auch bei diesen Prüflingen ausschließlich in Form von konzentrischen Moden. Allerdings ist zu erwarten, dass v.a. auf diesen Kapseln radiale Moden auftreten (wie in Abschnitt 2.4 bei der Schwingungssimulation erläutert), wenn man die Membran mit Hilfe von Luftschall zum Schwingen bringt.

5. Zusammenführung der objektiven und subjektiven Ergebnisse

5.1. Einfluss der Schwingung auf den Klang

Es konnte kein direkter Zusammenhang zwischen den entstehenden Moden und der Klangbeurteilung von Kapseln nachgewiesen werden. Die Moden sind zwar auf allen untersuchten Kapseltypen in unterschiedlichen Formen zu finden, jedoch lassen sich daraus in Verbindung mit den Ergebnissen der Hörtests keine validen Aussagen bezüglich ihres Einflusses auf den Klang treffen.

Viele wichtige und für die Klangeigenschaften entscheidende charakteristische Unterschiede zwischen unterschiedlichen Kapselkonstruktionen lassen sich nicht mit den altergebrachten Mess- und Analysemethoden ergründen. Die optische Abtastung bringt in Kombination mit alternativen Anregungssignalen deutliche Unterscheidungsmöglichkeiten mit sich. Vor allem die spektrale Betrachtung von eingeschwungenen Zuständen (siehe FFT der Sinussignale in Abschnitt 4.6.1), die impulshafte Anregung (siehe Rect/Burst in Abschnitt 4.6.1), die Ermittlung von Übertragungsfunktionen (sei es mittels Chirp oder Burst-Anregung), sowie die Untersuchung der realen Membranschwingungen anhand des Schwingungsbildes schaffen neuartige Betrachtungsmöglichkeiten. Es bleibt festzustellen, dass geübte Tonmeister in der Praxis intuitiv zum, für die Situation “richtigen”, Wandler greifen. Die gezeigten Analysemethoden bringen ein wenig Licht in diesen Graubereich, der bislang eher “aus dem Bauch heraus” entschieden wurde und jetzt objektiv zu ermitteln ist.

Zusammenfassend lassen sich zur Auswirkung der Membranschwingung auf den individuellen Klang einer Kapselkonstruktion die folgenden allgemeinen Aussagen treffen:

Generell scheint das “frühe” Auftreten der unterschiedlichen Modenformen dem menschlichen Ohr zuträglicher zu sein, als die “steife” Schwingung einer Metallmembran bspw. bei Messmikrofonen. Je flexibler das Membranmaterial ist (PVC/PE), desto schneller entstehen die Moden. Dieser Umstand wirkt sich dahingehend aus, dass der Wandler akustisch angenehmer klingt. Zusätzlich entstehen zum Grundsignal harmonische Obertöne. Diese verfälschen zwar objektiv das Signal und die Wiedergabe, führen aber subjektiv zu einem angenehmeren Klangbild, was nach Terhardt [117] psychoakustisch angenehmer ist (siehe Abschnitt 4.5.1).

Betrachtet man speziell die Dreieckskapsel (mit Metallmembran), ergab sich aus den o.g. Hörtests, dass Sprachsignale außerordentlich gut (“analytisch”) gewandelt wurden, die Aufnahme von Blechblasinstrumenten hingegen als unangenehm empfunden wurde. Die Erklärung ist: in der menschlichen Sprache sind harmonische Obertonanteile v.a. bei Vokalen enthalten, da die grundlegende Erzeugung auf eine stationäre Schwingung der

Glottis zurück zu führen ist (nach [116]). Blechblasinstrumente hingegen haben ein ausgeprägtes Obertonspektrum von ungeradzahligen (also unharmonisch klingenden) Anteilen. Wandelt man diese Signale nun mit einer Kapsel mit Metallmembran, die ihrerseits dem Signal noch zusätzliche ungeradzahlige Oberton-Anteile hinzufügt, wird dies entsprechend als unangenehm wahrgenommen. Das Hinzufügen von Obertonanteilen bei Sprachsignalen hingegen lässt das aufgezeichnete Signal im Direktvergleich präsenter wirken. Die Wahl und der subjektiv angenehme Klang von Großmembrankapseln mit goldbeschichteten Kunststoffmembranen bei vielen Aufnahmen ist darauf zurückzuführen, dass die - psychoakustisch als angenehm wahrgenommene - 1. Harmonische (K2) v.a. auf derartigen Membranen auftritt. Der Wandler fügt jedoch keinerlei weiteren Obertöne hinzu. Andere Kapselsysteme - v.a. mit Metallmembranen - bieten diese Eigenschaften nicht. Nach Helmholtz [122] reagiert das Ohr sehr sensibel auf Anteile von Oberwellen, bzw. Schwingungen (v.a. die 2. Harmonische, K3).

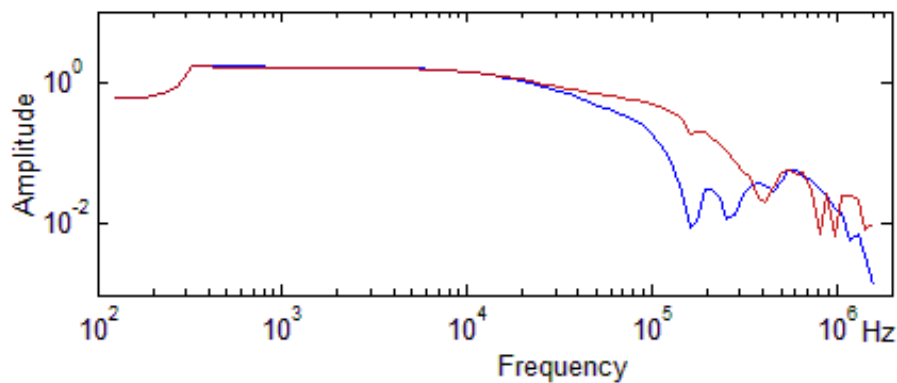


Abbildung 5.1.: optische Messungen am MK221 in der Membranmitte (blau) und am Membranrand (rot), Übertragungsfunktion, Burst-Signal 1 V_{pp}

Im Verlauf der Arbeit an schwingenden Membranen fiel frühzeitig auf, dass die Membranmitte im Vergleich zum Randbereich andere Schwingungsformen und -ausprägungen ausbildet. Dies geschieht sowohl in der Amplitude, als auch (beim Auftreten von Zirkularmoden) in zeitlicher Hinsicht. Das Masse-Feder-System Membran-Luftpolster, die mechanische Vorspannung sowie das elektrostatische Feld beeinflussen den Verlauf der Schwingung sowie die Frequenzen, bei denen sich die Zirkularmoden ausbilden. Zu hohen Frequenzen (ab ca. 25 kHz) hin verlagert sich gar die Schwingung bei den untersuchten Druckempfängern komplett in Richtung des Randbereiches. Dieser Effekt wurde näher untersucht. Hierzu wurde exemplarisch eine MK221-Kapsel an zwei Punkten vermessen und die Übertragungsfunktion ermittelt. Die visualisierten Messergebnisse finden sich in Abbildung 5.1. Hier ist deutlich zu sehen, dass der Randbereich der Kapsel der Schwingung zu hohen Frequenzen hin deutlich besser und in einer größeren Bandbreite folgt, als der Bereich der Membranmitte. Dies ist dadurch erklärbar, dass der Bereich der Membranmitte bei hohen Frequenzen schlicht zu träge ist, um dem Anregungssignal treu zu folgen. Dieser Umstand lässt sich konstruktiv ausnutzen.

5.2. Entwicklung eines Demonstrators

Basierend auf den Ergebnissen der Schwingungsmessungen konnte ein Demonstrator bzw. ein Prototyp einer neuartigen Kapselvariante entwickelt werden, bei dem die Gegenelektrode in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt wurde, die gegeneinander elektrisch isoliert sind. Die Modifikation der Gegenelektrode eines bestehenden und bewährten Kapselsystems erfolgte derart, dass die Teilflächen rotationssymmetrisch angelegt und elektrisch gegeneinander isoliert wurden (siehe Abbildung 5.2).

Die Teilsignale der isolierten Elektrodenflächen werden separat verstärkt und können am Ausgang des Mikrofons separat abgegriffen und weiterverarbeitet oder gespeichert werden. Zusätzlich wurde die Ladespannung der Gegenelektrode unter Zuhilfenahme eines Schalters in drei Schritten einstellbar gestaltet (0 V, + 60 V, + 80 V). Die Umsetzung und der Bau dieser Konstruktion ergab eine eindeutig hörbare Unterscheidungsmöglichkeit des Signals, das am Rand einer Membran entsteht, im Vergleich zu der schwingenden Mitte. Betrachtet man den Frequenzgang von beiden Elektrodenteilen zu gleichen Anteilen (siehe Abbildung 5.3, roter Graph), fällt eine Ähnlichkeit zu dem des M930 auf (siehe Anhang, Abbildung A.24). Die Gesamtelektrode zeigt eine nierenförmige Richtcharakteristik. Das Signal aus dem "Ring"-Bereich der Elektrode für sich betrachtet tendiert jedoch zu einer supernierenförmigen Richtcharakteristik (siehe Polar diagramme im Anhang D.33 und D.34). Der Amplituden- Frequenzgang der einzelnen Signale ergibt ebenfalls deutliche Unterschiede (siehe Abbildung 5.3). So hat der Mittenbereich der Membran einen deutlich geringeren Pegel im Vergleich zum Rand. Dies lässt sich durch die geringere Elektrodenfläche des Mittenbereiches auf der Gegenelektrode erklären (Mitte: ca. 63 mm^2 , Rand: ca. 219 mm^2).

Ebenso fällt auf, dass die Tiefen und Höhen im Bereich der Membranmitte im Vergleich zum Randbereich deutlich hervortreten. Eine Erklärung für den unteren Frequenzbereich ist die langsame Schwingung, die auf der, durch die Polarisationsspannung in Richtung Gegenelektrode gezogene Membranmitte bis zum Auftreten der ersten Mode ein stärkeres Signal liefert als der Randbereich, der in diesem Fall nur leicht schwingt. Die Überhöhung der hochfrequenten Anteile (ca. 3 kHz bis $11,6 \text{ kHz}$ in Abbildung 5.3) lassen sich durch den Druckstau vor der Membran und der daraus resultierenden Modenbildung erklären. Der Kapseldurchmesser beträgt $2,7 \text{ cm}$, der Durchmesser des Mikrofonskörpers inkl. Schutzkorb $4,5 \text{ cm}$. Bei einer Lufttemperatur von 20° beträgt die Wellenlänge einer Frequenz von 8 kHz $4,3 \text{ cm}$. Durch den Druckstau wird die Membranmitte als nachgiebigste

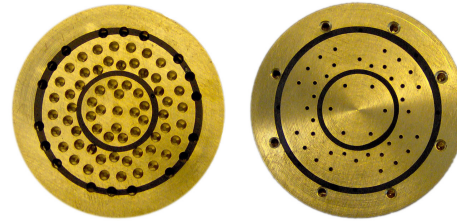


Abbildung 5.2.: Doppelelektrode, vorne (links), hinten (rechts), elektrisch isoliert: Rand, Ring, Mitte

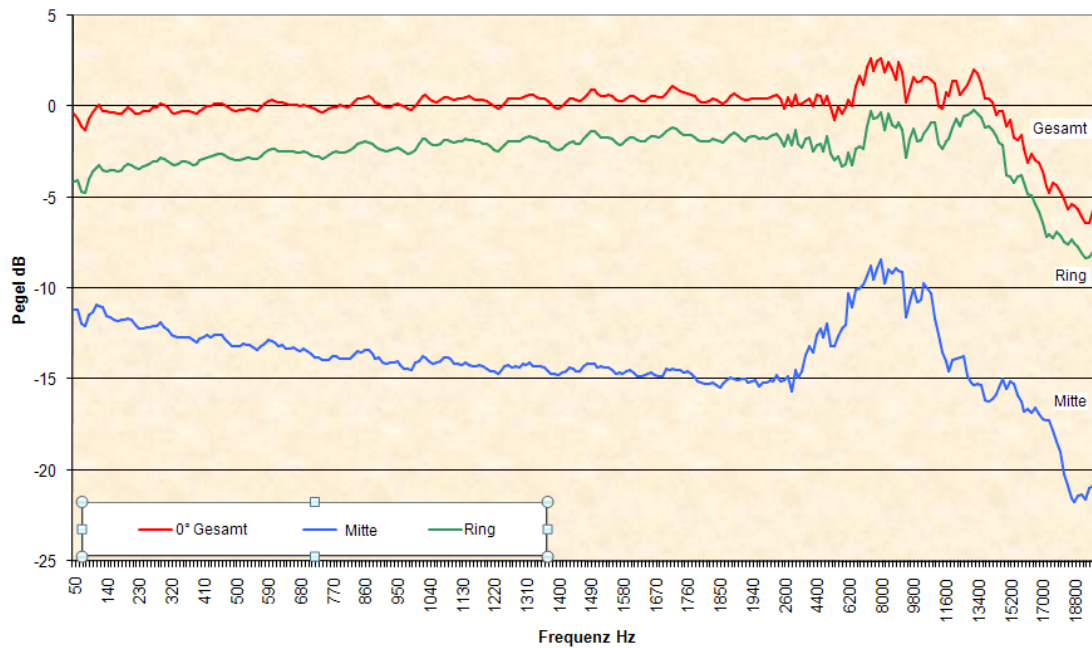


Abbildung 5.3.: Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons

Stelle der Membran weiter als bei anderen Frequenzen in Richtung der Gegenelektrode gedrückt. Das Resultat ist ein, im Vergleich zu anderen Frequenzen, um bis zu 6 dB höherer Pegel.

Die Rückwärtsdämpfung ist im Vergleich zur Kapsel mit Standard-Elektrode ebenfalls verändert: das Mikrofon ist bei Beschallung von hinten (180°) im Hochtonbereich deutlich empfindlicher (siehe Abbildung D.31 im Anhang). Alle weiteren Daten zum entwickelten Doppelelektroden-Mikrofon finden sich im Anhang (siehe D.27 und folgende).

Die Kapsel wurde in einer zweiten Version mit nur einem Verstärker beschaltet. Die Polarisationsspannungen sind jedoch auch hier unterschiedlich einstellbar (siehe Anhang, Abbildung D.27). Eine Veränderung der Ladespannungen führt zu unterschiedlichen Frequenzgängen, es sind deutliche Klangunterschiede hörbar. Allerdings wurde die Betrachtung des einkanaligen Verstärkertyps nicht weiter verfolgt, da die Ergebnisse der Zweikanal-Version mit den beiden getrennt abgenommenen Signalen besser analysiert werden können.

Mischt man beide Teilsignale zu gleichen Anteilen, erhält man nahezu unverändert den Klang der Standard-Kapselkonstruktion. Die Signalstärke der Einzelsignale ist jedoch nach wie vor abhängig von der effektiven Fläche der Gegenelektrode und dem Abstand zur Elektrode. Hierbei wiederum spielt das elektrostatische Feld eine Rolle, das eine Kraft auf die Membran ausübt und diese in Richtung der Gegenelektrode zieht. Aus einem geringeren Elektrodenabstand resultiert ein höherer Pegel. Werden beide Teilsignale separat verstärkt und miteinander gemischt, steigt der Rauschanteil im Gesamtsignal - bedingt durch die elektrische Verstärkung und den geringeren Pegel der Teilsignale - etwas an.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Unter Zuhilfenahme der gezeigten Methoden ist es möglich, den Klang einer Kapselkonstruktion an der Schwingungsform und Ausbildung der auftretenden Moden bzw. an der Ermittlung der Übertragungsfunktionen abzulesen. Soll ein bestimmter Klangcharakter erzielt werden, kann die Konstruktion bzw. die Auswahl der Materialien insofern geändert werden, dass die für den gewünschten und spezifischen Klang verantwortlichen Schwingungen forciert werden. Die Schwingung kann nach den dargestellten Methoden jederzeit berührungslos punktweise oder auf der gesamten Fläche gemessen und mit Hilfe der entwickelten Auswertungsroutinen analysiert werden.

Tabelle 6.1 zeigt die Auswirkungen, die eine Veränderung der Membranspannung bei Messmikrofonen (Druckempfänger) bei reziproker Schwingungsanregung zur Folge hat. Eine Erhöhung der elektrischen Polarisationsspannung wirkt sich im Vergleich ähnlich aus, wie eine Verringerung der mechanischen Membranspannung. Die Membran biegt sich stärker in Richtung Gegenelektrode, das Mikrofon wird empfindlicher. Die Schwingung wird allerdings durch das größere elektrostatische Feld stärker beeinflusst (u.a. folgt ein früheres Auftreten der ersten Zirkularmode). Die maximale Schwingungsamplitude steigt in der Folge. Ein ähnlicher Effekt ist zu sehen, wenn die mechanische Membranspannung reduziert wird. Die Schwingungsamplitude ist umgekehrt proportional zum Elektrodenabstand. Überschreitet die mechanische Spannung der Membran einen bestimmten Wert, führt das in der Folge zu einem Überspringen bei Messungen mit impulshaften Signalen (siehe Kapsel "C3" in Abbildung 4.17). Die Membran schwingt mit der eigenen Resonanzfrequenz nach.

Der Klang einer Kapsel ist maßgeblich von der Schwingung ihrer Membran abhängig. Diese wiederum ist von einer Reihe unterschiedlicher Parameter beeinflusst, allen voran dem Membranmaterial und deren mechanischer Vorspannung. Geometrische Unterschiede der Kapselform beeinflussen u.a. das modale Verhalten der Membran und damit ebenfalls den individuellen Klang der Konstruktion. Vor allem hat sich gezeigt, dass die Ausbildung der harmonischen Obertöne stark zur subjektiven Wahrnehmung der Mi-

mechanische Membranspannung	Elektroden- abstand	Empfind- lichkeit	Impuls- verhalten	Frequenz- verhalten
normal	normal	normal	normal	ausgeglichen
stärker	größer	geringer	besser	Höhen stärker
geringer	geringer	größer	schlechter	Höhen schwächer

Tabelle 6.1.: Auswirkungen von unterschiedlichen mechanischen Membranspannungen bei Druckempfängern

Material	Form	Masse	Bandbreite	Impulsverhalten	Harmonische	Klang
Kunststoff + Gold	KM rund / klein	groß	gering	relativ gut	K1, K2	(sehr) gut
Kunststoff + Gold	GM rund / groß	geringer	größer	besser	K1, K2	(sehr) gut
Nickel	Messmik. rund, 1" & $\frac{1}{2}$ "	gering	noch größer	sehr gut	K1, K2-4	verwaschen
Aluminium	Dreieck	relativ gering	gering	relativ gut	K1, K2-4	transparent/ verwaschen
Kunststoff + Gold	Rechteck	relativ groß	gering	relativ gut	K1	(sehr) gut

Tabelle 6.2.: Übersicht über unterschiedliche Parameter bei Druck- und Gradientenempfängern, klangliche Auswirkungen

krofone beiträgt, die - je nach Membranmaterial und -form - unterschiedlich ausgeprägt sind. Tabelle 6.2 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Parameter in einer Übersicht. Es sind keine absoluten Werte genannt, jedoch lässt sich jeweils eine Tendenz erkennen. Verringert man die Membranmasse (bspw. durch eine dünnere Membran bzw. Beschichtung), verbessert sich entsprechend das Schwingungs- und Impulsverhalten. Dies ist zu sehen bei den Kleinmembran- im Vergleich zu Großmembranmikrofonen (KM und GM in Tabelle 6.2). Generell scheint eine beschichtete Membran (wie bei Gradientenempfängern üblich) die bessere Alternative zu sein. Die beiden Komponenten des Membranmaterials beeinflussen sich anscheinend insofern, als dass der Kunststoff die (Eigen-) Schwingung des Goldes eliminiert. Dies lässt sich umgekehrt bei der Betrachtung des spektralen Verhaltens der Druckempfänger (bzw. der Wandler mit reiner Metallmembran) sehen. Diese fügen dem Signal weitere (nicht harmonische) Obertöne hinzu, die eine klangliche Veränderung bewirken.

Rechteckige Kapselkonstruktionen verfügen im Vergleich zu rotationssymmetrischen, runden Kapseln über einen größeren "Randbereich" auf der Membran. Somit wandeln sie transiente Klanganteile mit größerem Einfluss auf den Gesamtklang und werden damit in subjektiven Tests als "natürlicher" klingend wahrgenommen. Auch scheinen rechteckige Kunststoffmembranen das Mittel der Wahl zu sein, da bei dieser Konstruktion die wenigsten Obertöne auf der Membran entstehen. Die ELMC-Kapsel hat bei den Hörtests - beinahe unabhängig von den Anregungssignalen - immer eine relativ gute Bewertung erhalten. Dies lässt sich durch die in 4.13 gezeigten spektralen Messergebnisse untermauern. Metallmembranen scheinen insofern Einfluss auf den Klang zu nehmen, dass sie zusätzlich zu dem Grundton und der ersten Harmonischen (wie bei M71) noch die zweite und dritte Harmonische hinzufügen. Dieser Effekt wirkt sich psychoakustisch auf den Klang der Wandler aus.

Der realisierte Kalibrier- und Messplatz lässt eine vollumfängliche und v.a. schnelle Schwingungsanalyse zu. Durch die Unabhängigkeit der beiden Anregungsmethoden

(Luftschall und Reziprozitätsverfahren) wird der unmittelbare und direkte Vergleich der Ergebnisse der optischen mit denen der akustischen Messung möglich. Darüber hinaus kann mittels des - in der Kalibrierung von Messmikrofonen üblichen - Reziprozitätsverfahrens eine Schwingungsanalyse auch in Frequenzbereichen weit oberhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenzen erfolgen. Dies hilft maßgeblich bei einer Erweiterung des Frequenzbereiches für die Kalibrierung. Letztlich kann die Schwingung oberhalb von 20 kHz zwar vom menschlichen Gehör nicht mehr wahrgenommen oder von herkömmlichen Lautsprechern linear wiedergegeben werden, wohl aber im Reziprozitätsverfahren angeregt und laseroptisch vermessen werden. Dieser Frequenzbereich des Wandlers spielt auch psychoakustisch eine Rolle hinsichtlich der Anschwingvorgänge, bzw. der Transientenwandlung. Dieser Umstand wurde u.a. bei der Untersuchung mit impulshaften Signalen genauer betrachtet und ausgewertet. Durch die Ermittlung der realen Membranschwingung ist eine Primärkalibrierung von Kapseln möglich. Die in der Kalibrierung übliche Referenzkapsel kann durch die messbaren Absolutwerte der Membranschwingung ersetzt werden. Gleiches gilt für die Empfindlichkeitsmessung (Delta-C), die durch die Messung der Membrandelokalisation bei Anlegen der Polarisationsspannung substituiert werden kann. Die Empfindlichkeit (gemessen in $\frac{mV}{Pa}$) kann anschließend aus der gemessenen Wegstrecke berechnet werden. Das Verfahren ist (neben der "herkömmlichen Kalibrierung") für die Tieftonkalibrierung, genauso wie für die Messung im Ultraschallbereich (bis 100 kHz oder darüber) einsetzbar, da auch hier Absolutwerte bestimmt werden können, die sich miteinander vergleichen lassen. Insbesondere beim Einsatz eines kombinierten Prüfstandes (Luft- und Reziprozitätsanregung zur Membranschwingung) ist der direkte Vergleich von optischen mit elektrischen Werten möglich und sinnvoll. Darüber hinaus lassen sich neben der gebräuchlichen Nutzung von Sinustönen auch Chirp-Funktionen zur schnellen Kalibrierung verwenden.

Die gewonnenen Ergebnisse aus den Schwingungsanalysen lassen sich insofern weiter nutzen, als dass die Übertragungsfunktionen der einzelnen Kapseln u.a. auf beliebige Signale übertragen werden können. Somit wird es möglich, beliebige Klänge im Sound der jeweiligen Konstruktion erklingen zu lassen. Das Schwingungsverhalten wird hierbei über die Funktion des Klangs gefaltet. So ist eine Umsetzung der Ergebnisse auch als Softwareplugin für Soundprogramme denkbar, bei dem beliebige Signale so klingen, als seien sie mit spezifischen Kapseln aufgenommen worden.

Die gezeigten Messmethoden lassen die reale Schwingung abbilden und damit neue Schlüsse zur Klangbeurteilung bzw. Unterscheidung von Kapselkonstruktionen zu. Das aufgedeckte Feld der schwingenden Membranen ist groß und verlangt noch nach vielen weiteren, gründlichen Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Condenser Microphones and Microphone Preamplifiers for acoustic measurements.* Brüel and Kjaer, 1982.
- [2] *Michelson interferometry with 10 pm accuracy.* J. Lawall and E. Kessler, 2000.
- [3] *Anwenderdokumentation zum Laserinterferometrischen Vibrometer SP-S 120/500.* SIOS Meßtechnik GmbH, 2001.
- [4] *Physikum Exakt - Das gesamte Prüfungswissen für die 1. Aerzteprüfung.* Number 4. Hamid Emminger, 2003.
- [5] COMSOL Multiphysics 4.3. Simulation. *The Bruel and Kjaer 4134 Condenser Microhone*, Documentation, 2012.
- [6] H. Kodama Y. Yasuno A. Ohyagi, D. Adachi. Electret condenser microphones for measurement instruments. Technical report, Kobayasi Institute of Physical Research.
- [7] Agostino Abbate, Casimer M. DeCusatis, and Pankaj K. Das. *Wavelets and Subbands.* Birkhäuser, 2002.
- [8] Fatameh Torkaman Pary Akbar Ranjbar, Mohammad Taghi Mehrabani. A numerical study on the viscous damping effect for a condenser microphone. Article, IEEE Sensors Journal, June 2011.
- [9] Ulrich Apel. *Wenn das Mikrofon zum Messgerät wird.* 2007.
- [10] Burhanuddin Yeop Majlis Bahram Azizollah Ganji. Condenser microphone performance simulation using equivalent circuit method. Article, IEEE MEMS Laboratory, University Kebangsaan Malaysia, 2004.
- [11] Glen M. Ballou, editor. *Handbook for Sound Engineers.* Focal Press, 3 edition, 2002.
- [12] Richard Barnert and Friedrich Reining. Der sichtbare Klangunterschied von Mikrofonen. 21. VDT, Hannover, 2002.
- [13] Giuliana Benedetto, Roberto Gavioso, and Renato Spagnolo. Measurement of microphone membrane displacement with an optical beam deflection technique. *American Institute of Physics*, April 1995.

- [14] Leo L. Beranek and Tim J. Mellow. *Acoustics - Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 2012.
- [15] Klaus Betzler. Numerische Lösung partieller Differenzialgleichungen. Technical report, Uni Osnabrück, Juni 2005.
- [16] Jens Blauert. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT Press, Massachusetts, 1997.
- [17] Gerhard Bore and Stephan Peus. *Mikrophone, Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Georg Neumann GmbH, Berlin, 4 edition, 1999.
- [18] Günther Boye and Urbi F. Herrmann. *Handbuch der Elektroakustik*. Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 3 edition, 1989.
- [19] Brüel and Kjaer. *Product Data, Condenser Microphone Cartridges — Types 4133 to 4181*. Brüel and Kjaer.
- [20] Michel Bruneau, Anne-Marie Brunneau, Zdenek Skvor, and Pierrick Lotton. An equivalent network modelling the strong coupling between a vibrating membrane and a fluid film. Technical report, acta acustica 2, June 1994.
- [21] Andrzej Brykalski. *Untersuchung des Verhaltens von nichtstationären elektromagnetischen und thermischen Feldern mit numerischen Verfahren*. PhD thesis, TU-Ilmenau, April 1956.
- [22] Markus Bühner and Matthias Ziegler. *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Pearson Studium, München, 2009.
- [23] Jen-Yi Chen, Yu-Chun Hsu, Tamal Mukherjee, and Gary K. Fedder. Modeling and simulation of a condenser microphone. *Transducers and Eurosensors*, 14:4, June 2007.
- [24] Jen-Yi Chen, Shu-Sheng Lee, Peter Chang, Chun-Hsun Chu, Tamal Mukherjee, and Gary K. Fedder. A schematic-based design model for microphone and circuit integration. article, Microsystems/Taiwan, Robots Institute/USA, Carnegie Mellon University/USA.
- [25] Immanuel Claashen. Untersuchung der Klangeigenschaften unterschiedlicher Kondensatormikrofone. Diplomarbeit, Tu-Ilmenau, February 2012.
- [26] Comsol. *Condenser Microphone, Axisymmetric with Electrical Lumping*. Comsol, 2011.
- [27] Carson Crandal. Abstracts of recent technical books and papers from bell system sources, different.
- [28] I.B. Crandall. Air-damped vibrating system: theoretical calibration of the condenser transmitter. *Physical Review*, page 12, 1918.

- [29] Irving B. Crandall. *Theory of vibrating systems and sound*. D. Van Nostrand Company/Bell Telephone Labs, 1926.
- [30] Martin Dadic. Numerical determination of electric field forces and capacitance of pressure condenser microphone. *IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement*, 51(6):4, December 2002.
- [31] DEGA. Akustische Wellen und Felder. Technical report, DEGA-Empfehlung 101, March 2006.
- [32] Michael Dickreiter. *Handbuch der Tonstudioteknik - Teil 1*, volume 1. K G Saur, 6 edition, 1997.
- [33] Michael Dickreiter. *Handbuch der Tonstudioteknik - Teil 2*, volume 2. K G Saur, 6 edition, 1997.
- [34] Andrew D. Dimarogonas and Sam Haddad. *Vibration for Engineers*. Prentice-Hall International, 1992.
- [35] Axel Donges and Reinhard Noll. *Lasermesstechnik, Grundlagen und Anwendungen*, volume 4. Hüthig, 1993.
- [36] Denys Dontsov. Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsanalyse. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau, 2002.
- [37] John Eargle. *The Microphone Book*. Focal Press, 2001.
- [38] B.B. Bauer et al. A century of microphones. *Proceedings of the IRE*, page 11, 1962.
- [39] Richard P. Feynman. *Quantum Electrodynamics*, volume 1. California Institute of Technology, December 1997.
- [40] Helmut Fleischer and Hugo Fastl. Physikalische und gehörbezogene Analyse von Paukenklängen. *Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik*, Juli 2008.
- [41] Andreas Franck. *Finite-Elemente-Methoden, Lösungsalgorithmen und Werkzeuge für die akustische Simulationstechnik*. Dissertation, RWTH Aachen, 2008.
- [42] Paolo Gatti and Vittoria Ferrari. *Applied structural and mechanical vibrations*. E and FN Spon, 1999.
- [43] Michael Gayford. *Microphone Engineering Handbook*. Focal Press, 1994.
- [44] Microtech Gefell GmbH. *MK221 - manual and technical specifications*. Microtech Gefell GmbH.
- [45] Microtech Gefell GmbH. *Firmenhistorie 75 Jahre Microtech Gefell, G. Neumann KG*. MTG GmbH, 2003.

- [46] Anselm Goertz and Monika Laws. Vergleich messtechnischer Ergebnisse und Hörversuche bei Leistungsverstärkern im Grenzlastbereich. *Audio and Acoustics Consulting Aachen*, page 32.
- [47] Thomas Görne. Der Irrtum vom neutralen Klang - Zu den objektiven und subjektiven Eigenschaften von Mikrofonen. page 9.
- [48] Thomas Görne. *Mikrofone in Theorie und Praxis*. Elektor, 7 edition, 2004.
- [49] Roger S. Grinnip. *Paper: Advanced Simulation of a Condenser Microphone Capsule*. AES, 2006.
- [50] C. Guianvarch and J.-N. Durocher. Improved formulation of the acoustic transfer admittance of cylindrical cavities. *Acta Acustica United with Acustica*, 92:10, 2006.
- [51] Gerhard Haas. *Audioschaltungen für Tontechnik, Studio und PA*. elektor, 1996.
- [52] Jacquelynn Hebrock, Kelly Statham, and Chuck Kraft. Psychoacoustic effects of ringing in microphones. *AES Convention*, page 26, September 1997.
- [53] Georg Heike and Heinrich Dünnwald. Neuere Klanguntersuchungen an Geigen und ihre Beziehung zum Gesang. electronically.
- [54] Hugo Fastl Helmut Fleischer. Vibroakustische Untersuchungen an Paukenfellen. *Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik*, page 127, 2005.
- [55] Dorel Homentcovschi and Ronald N. Miles. An analytical-numerical method for determining the mechanical response of a condenser microphone. Article, Department of Mechanical Engineering, State University NY, September 2011.
- [56] H.A. Aebischer H.P.W. Gottlieb. Eigenfrequency shifts of a baffled circular membrane in a fluid medium. *Acustica*, page 6, 1986.
- [57] H.A. Aebischer H.P.W. Gottlieb. Eigenfrequencies of a baffled circular membrane with exterior fluid and attached cavity. *Acustica*, 1987.
- [58] Chien-Hsin Huang, Chien-Hsing Lee, Tsung-Min Hsieh, Li-Chi Tsao, Shaoyi Wu, Jhyy-Cheng Liou, Ming-Yi Wang, Li-Che Chen, Ming-Chuen Yip, and Weileun Fang. Implementation of the cmos mems condenser microphone with corrugated metal diaphragm and silicon back-plate. *Sensors 2011*, 11:13, May 2011.
- [59] John David Jackson. *Classical Electrodynamics*, volume 3. John Wiley and Sons, Inc., 3 edition, 2001.
- [60] Rahman Jamal and Andre Hagestedt. *LabView - Das Grundlagenbuch*. Addison-Wesley, 4 edition, 2004.
- [61] Pete Janzow and Jow Scordato, editors. *The Student Edition of Matlab*. The MathWorks, 1992.

- [62] A.M. Brzezinski J.E. Warren. Capacitance microphone static membrane deflections. *Acoustical Society of America*, 52:10, 1972.
- [63] J.F. Hamilton J.E. Warren, A.M. Brzezinski. Capacitance microphone dynamic membrane deflections. *Acoustical Society of America*, 54:13, 1973.
- [64] Wolfgang Kainz. Analytical solution of a condenser microphone model as an example of the mathematical treatment of coupled acoustic systems. Article, *The journal of the Acoustical Society of America*, 1996.
- [65] Walt Kester. *The Data Conversion Handbook*. Number ISBN 0-916550-27-3. Analog Devices, Inc., 2004.
- [66] Uwe Kiencke and Ralf Eger. *Messtechnik, Systemtheorie für Elektrotechniker*. Springer, 6 edition, 2004.
- [67] Chulsoo Kim, Jongkyu Jung, Jiseong Jeong, and Kyihwan Park. Vibration reduction of an atomic force microscope in the point of the mechanical design. *The Society for Experimental Mechanics*, page 7, 2011.
- [68] Kazuho Ono Akio Ando Kimio Hamasaki, Toshiyuki Nishiguchi. Perceptual discrimination of very high frequency components in musical sound recorded with a newly developed wide frequency range microphone. *AES Convention*, October 2004.
- [69] Thomas Kite. Fast audio-band measurement using log-swept chirp signals. presentation, September 2008.
- [70] Wolfgang Klippel and Robert Werner. Measurement and perception of regular loudspeaker distortion. *Spotlight*, page 8, May 2011.
- [71] Dieter Kreß and Ralf Irmer. *Angewandte Systemtheorie*. VEB Verlag Technik, 1989.
- [72] Horace Lamb. On the vibrations of an elastic plate in contact with water. *Proceedings of the The Royal Society*, page 13, October 1920.
- [73] Thomas Lavergne, Stéphane Durand, Michel Bruneau, and Nicolas Joly. Dynamic behavior of the circular membrane of an electrostatic microphone: Effect of holes in the backing electrode. Technical report, Laboratoire d’Acoustique de l’Université du Maine, 2010.
- [74] A.B. Lawrence. Noise reduction of floors walls and ceilings. *Australian Acoustical Society*, page 117, September 1969.
- [75] Melvin Lax. The effect of radiation on the vibrations of a circular diaphragm. *Journal of the Acoustical Society of America*, 16(1):9, July 1944.

- [76] Jan Lunze. *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*, volume 7. Springer, 2008.
- [77] J.R. Macdonald and D.E. Edmondson. Exact solution of a time-varying capacitance problem. *Proceedings of the IRE*, 1961.
- [78] Kurt Magnus and Karl Popp. *Schwingungen*. Teubner Studienbücher, 3 edition, 1997.
- [79] Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*, volume 24. Springer-Verlag, 24 edition, August 2010.
- [80] Jürgen Meyer. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, volume 24. Edition Bochinsky, 4 edition, 2004.
- [81] Meinard Müller Michael Clausen. Zeit-Frequenz-Analyse und Wavelettransformationen. Technical report, Bonn Universität, März 2001.
- [82] Piet Bergveld Michael Pedersen, Wouter Olthuis. High-performance condenser microphone with fully integrated cmos amplifier and dc-dc voltage converter. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 7(4):8, December 1998.
- [83] Michael Möser and Gerhard Müller. *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer-Verlag, 3 edition, 2003.
- [84] M.A. Olmstead, N.M. Amer, and S. Kohn. Photothermal displacement spectroscopy - an optical probe for solids and surfaces. *Applied Physics A, Solids and Surfaces*, July 1983.
- [85] Holger Pastillé. Über die Nichtlinearitäten am Kondensatormikrofon unter besondere Berücksichtigung der Membran. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001.
- [86] Hans J. Paus. *Physik in Experimenten und Beispielen*, volume 3. Hanser, 2007.
- [87] I. G. Petritskaya. Impedance of a thin layer of air in the harmonic vibrations of a membrane. *Soviet Physics-Acoustics*, 12(2):6, December 1966.
- [88] I. G. Petritskaya. Vibrations of a membrane loaded with a thin layer of air. *Soviet Physics-Acoustics*, 14(1):2, September 1968.
- [89] Stephan Peus. Impulsverhalten von Mikrofonen. *radio-mentor-electronic, Heft 5/76*, page 4, May 1976.
- [90] Stephan Peus. Modern acoustic and electronic design of studio condenser microphones. *AES Convention*, page 8, May 2004.
- [91] Brüel Philip White and Kjaer. Evaluation of studio microphone performance using time delay spectrometry techniques. *AES Convention*, 1982.

- [92] Wolfgang Pöschl, Denis Dontsov, and Eberhard Manske. *Der Geometrie auf der Spur*. Laser+Photonik, 2006.
- [93] Prof. Dr. Paul Profos. *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. Oldenbourg Verlag, 1994.
- [94] A.J. Putman. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy. paper, University of Twente, October 1991.
- [95] C. Rajalingham and R.B. Bhat. Influence of an electric field and diaphragm stability and vibration in a condenser microphone. *Journal of Sound and Vibration*, page 9, 1998.
- [96] C. Rajalingham, R.B. Bhat, and G.D. Xistris. Vibration of rectangular plates using plate characteristic functions as shape functions in the rayleigh-ritz method. *Journal of Sound and Vibration*, page 13, 1996.
- [97] Akbar Ranjbar, Mohammad Taghi Mehrabani, and Fatameh Torkaman Pary. Numerical study on the transient response of a condenser microphone. *IEEE Sensors Journal*, 12(8):9, August 2012.
- [98] Akbar Ranjbar, Mohammad-Ali Saeimi-Sadigh, and Bashir Behjat. Numerical fluid structural interface analysis in condenser microphone design. *Journal of Mechanical Science and Technology, Springer*, 2011.
- [99] W. Reichardt. *Grundlagen der Elektroakustik*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, 3 edition, 1960.
- [100] Thomas Rewig. Optimierung eines Mess-Systems zur Reziprozitätskalibrierung von Labor-Normalmikrofonen. Diplomarbeit, TU-Ilmenau, Audiovisuelle Technik, November 2008.
- [101] Donald H. Robey. Theory of the effect of a thin air film on the vibrations of a stretched circular membrane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26(5):2, September 1954.
- [102] Martin Schneider. Transients in microphones: Pop and impulse. *AES UK Conference*, page 9.
- [103] Martin Schneider. Pop measurement, low-frequency response and microphone construction. *AES Convention*, page 9, may 1998.
- [104] Martin Schneider. Kondensatormikrofone im Vergleich. *VDT, 26. Tonmeistertagung*, page 7, November 2010.
- [105] Martin Schneider. Microphone choice: Large or small, single or double. *AES Convention*, page 8, May 2010.

- [106] Michaela Schuster. Entwicklung eines zeitoptimierten Messplatzes zur präzisen Bestimmung von Kalibrierdaten und Richtcharakteristiken von Messmikrofonen mit breitbandigen Prüfsignalen. Diplomarbeit, TU-Ilmenau, IMT, digitale Medien, November 2008.
- [107] G.M. Sessler. Electric fields and forces due to charged dielectrics. Technical report, Bell Telephone Laboratories, July 1971.
- [108] G.M. Sessler and J.E. West. Self-biased condenser microphone with high capacitance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(11):2, November 1962.
- [109] SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau. *Anwenderdokumentation Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor SP 120/500/2000*.
- [110] Oliver Sittler. Analyse der Schwingungsausbreitung auf Membranoberflächen von Kondensatormikrofonen. Diplomarbeit, TU-Ilmenau, 2007.
- [111] William B. Snow. Calibration and rating of microphones. *IRE Transactions on Audio*, page 9, 1960.
- [112] Julius Adams Stratton. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill Book Company, January 1941.
- [113] Thierry Le Van Suu, Stephane Durand, and Michel Bruneau. Fluid layer trapped between a plane, circular membrane and an axisymmetrically curved, smooth backing wall: Analytical model of the dynamic behaviour. *Acta Acustica United with Acustica*, 94:9, 2008.
- [114] Michael Talbot-Smith, editor. *Audio Engineer's Reference Book*. Focal Press, 1994.
- [115] K. Teer. On the optimum configuration for a condenser microphone. Technical report, Philips Research Laboratories, 1965.
- [116] Ernst Terhardt. *Akustische Kommunikation*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [117] Ernst Terhardt. Die psychoakustischen Grundlagen von Tonverwandtschaft und Harmonie. *DAGA '06 Braunschweig*, 2006.
- [118] Benson H. Tongue. *Principles of Vibration*. Oxford, 2 edition, 1996.
- [119] Guy Torio. Understanding the transfer functions of directional condenser microphones in response to different sound sources. *Publication shure*, page 23.
- [120] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik 1*. Vieweg, 2005.
- [121] Rolf Unbehauen. *Grundlagen der Elektrotechnik 1*, volume 5. Springer, 1999.
- [122] Hermann von Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Vieweg, 1863.

- [123] Udo Wagner. Kombinierte Eichgitter-Druckkammer-Meßtechnik zur Qualitätssicherung von Kondensatormikrofonen. Diplomarbeit, TU Chemnitz-Zwickau, 1995.
- [124] J.E. Warren. Capacitance microphone dynamic membrane deflections: Comments and further results. *Journal of the Acoustical Society of America*, 58:8, 1975.
- [125] Johannes Webers. *Handbuch der Tonstudientechnik für Film, Funk und Fernsehen*, volume 9. Franzis, 2007.
- [126] Stefan Weinzierl. *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [127] E.C. Wente. A condenser transmitter as a uniformly sensitive instrument for the absolute measurement of sound intensity. Technical report, Research Laboratory of the American Telephone and Telegraph Co. and Western Electric Co. Inc.
- [128] Tobias Werner. Hörbarkeit und klangliche Bewertung der nichtlinearen Verzerrungen von Kondensatormikrofonen. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Fakultät I, Audiokommunikation, März 2010.
- [129] Irving Wolff. Sound measurements and loudspeaker characteristics. *Technical and Test Department, Radio Corporation of America*, 16(12):13, December 1928.
- [130] George S.K. Wong and Tony F.W. Embleton, editors. *AIP Handbook of Condenser Microphones*. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing, 1995.
- [131] Gerhard Wunsch. *Handbuch der Systemtheorie*. Akademie-Verlag Berlin, 1986.
- [132] Jörg Wuttke. *Mikrofonaufsätze*. SCHOEPS, 2 edition, 2000.
- [133] Rao Yarlagadda. *Analog and digital signals and systems*. Springer, 2009.
- [134] Yoshinobu Yasuno and Yasuhiro Riko. A chronological review of production and applications of electret condenser microphone for consumer use. *Japan Acoustics*, page 6, 1994.
- [135] Harry K. Zaveri. Technical Review - Primary Calibration using Laser Interferometry, Infrasound Calibration of Microphones, High-temperature IEPE-Accelerometer. Technical report, Brüel and Kjaer, 2008.
- [136] Manfred Zollner and Eberhard Zwicker. *Elektroakustik*. Springer-Verlag, 3 edition, 1993.
- [137] Allan J. Zuckerwar. Theoretical response of condenser microphones. Technical report, Old Dominion University Research Foundation, Norfolk, July 1978.

Tabellenverzeichnis

2.1. Nullstellen der Besselfunktion nullter, erster und zweiter Ordnung, nach [85]	21
3.1. Im Hörtest untersuchte Mikrofone	27
3.2. Ausgewählte Klangbeispiele für den Hörtest	28
3.3. Levene-Tests der Attribute über alle Klangbeispiele	33
4.1. Frequenzen des Multisinus-Tones	51
4.2. Variation der mechanischen Membranspannung sowie des Materials, Übersicht über die Delokalisation der Membranen von MK221-Kapseln bei Anlegen der Polarisationsspannung	54
4.3. gemessene Delokalisation der Membranen von MK102-, M296- und MK221-Kapseln	54
6.1. Auswirkungen von unterschiedlichen mechanischen Membranspannungen bei Druckempfängern	78
6.2. Übersicht über unterschiedliche Parameter bei Druck- und Gradientenempfängern, klangliche Auswirkungen	79
A.1. Parameter der Dreieckskapsel, Ehrlund	100
A.2. Parameter der Rechteckskapsel, ELMC	101
A.3. Parameter des KM184, Neumann	102
A.4. Parameter des M300, MTG	103
A.5. Parameter des M70 Nickel, MTG	104
A.6. Parameter des M70 PET, MTG	105
A.7. Parameter des M71 PET - symmetrisch, MTG	106
A.8. Parameter des M71 PET - asymmetrisch, MTG	107
A.9. Parameter des M71 PVC - symmetrisch, MTG	108
A.10. Parameter des C414, AKG	109
A.11. Parameter des U87Ai, Neumann	110
A.12. Parameter des M930, MTG	111
B.1. Levene-Test, Attribut: Bass/Höhen-Balance	116
B.2. Levene-Test, Attribut: Natürlichkeit	116
B.3. Levene-Test, Attribut: Nähe	116
B.4. Levene-Test, Attribut: Transparenz	116

Abbildungsverzeichnis

0.1. Georg Neumann und Erich Kühnast beim Experimentieren am Mikrofon [45]	7
2.1. Klassen von Schallquellen, nach [116]	10
2.2. Aufbau eines Klanges, nach Frequenz, Pegel und Zeit, Modellvorstellung nach [80]	11
2.3. Kondensatormikrofone (Gradientenempfänger), U87 (links), C414 (Mitte), M930 (rechts)	14
2.4. Druckempfänger, Kapsel-Aufbau nach [1]	16
2.5. schematische Darstellung der grundlegenden Richtcharakteristiken: Kugel (links), Acht (Mitte), Niere (rechts) [25]	17
2.6. Ein- und Doppelmembransysteme von Druck- und Druckgradientenempfängern und die resultierenden Richtcharakteristiken, nach [126]	18
2.7. einige mögliche Modenformen auf Kreismembranen, Simulation aus [85]	21
2.8. COMSOL-Modell, Simulation der Schwingung einer 1/2"-Kapsel bei 1 kHz (links) und 20 kHz (rechts), nach [5]	22
2.9. COMSOL-Simulation, Ausbreitung des elektrostatischen Feldes bei einer 1/2"-Kapsel, nach [5]	23
2.10. Sensorkopf, Planspiegel- interferometer SP/S [3]	23
2.11. schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers zur Abtastung optisch rauer Oberflächen, nach [36]	24
3.1. Aufnahme-Setup Lautsprecher, Blockschaltbild	29
3.2. Aufnahme-Setup Flügel, Blockschaltbild	29
3.3. Wiedergabe-Setup	32
3.4. Randmittel des Attributs "Bass/Höhen-Balance"	34
3.5. Randmittel des Attributs "Nähe"	35
3.6. Vergleich der Ergebnisse der Attribute "Nähe" und "Bass/Höhen-Balance"	36
3.7. Randmittel des Attributs "Transparenz"	37
3.8. Randmittel des Attributs "Natürlichkeit"	38
3.9. Randmittel des Attributs "Allgemeines Ranking"	40
4.1. Aufbau des Messplatzes bei SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau	43
4.2. schematischer Aufbau des Messplatzes zur optischen Abtastung von schwingenden Membranen	44
4.3. schematischer Messaufbau - erweitert um Luftschallanregung mit Hilfe eines Lautsprechers	45
4.4. LTI-System mit FFT-Auswertung	48

4.5.	reziproke Anregung, $2 V_{pp}$ - exp. Chirp $20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$ bei MK221 (oben) und MK102 (unten), Membranmitte, $f_{abtast}=50\text{ kHz}$	50
4.6.	elektrostatisches Feld	53
4.7.	entwickeltes Verfahren der Zeigermessung, Rotation um den Mittelpunkt	55
4.8.	Übertragungsfunktion von M70-Kapseln mit Ni-Membran (rot) und PET-Membran (blau), Chirp-Anregung ($20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$), Abtastung in der Membranmitte	57
4.9.	Calibration Chart Microtech Gefell, MK102.1 und MK221	58
4.10.	Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von M296 (grün) und MK102 (blau)	59
4.11.	Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von MK102.1 (grün) und MK102 (blau)	60
4.12.	Amplituden- Frequenzgang, Vergleich von MK221 (grün) und MK102 (blau)	61
4.13.	FFT bei $6,5\text{ kHz}$, ELMC, M71, Dreieck, MK221 (von oben nach unten), Auftreten der Harmonischen (K2-4), Hinweis: bei Dreieck und MK221 ist die Y-Achse gezoomt	62
4.14.	Vergleich von M7-Kapsel (oben, Polarisationsspannung 80 V) und MK102-Kapsel (unten, Polarisationsspannung 200 V) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung, Abtastung in der Membranmitte	63
4.15.	MK102, Burst-Anregung $+2\text{ V}$, 80 V Speisespannung (oben), 200 V (unten), Abtastung in der Membranmitte	64
4.16.	MK102 (oben), MK221 (Mitte), MK301 (unten) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung	65
4.17.	MK221 mit unterschiedlich stark gespannter $2\text{ }\mu\text{m}$ - Edelstahlmembran, C1 schwach (oben), C2 mittel (Mitte), C3 stark (unten) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung	66
4.18.	M70-Kapsel, Membranmaterial Nickel (oben), goldbeschichtetes PET (unten) bei $+2\text{ V}$ Burst-Anregung	67
4.19.	Amplituden- Frequenzgang der M70-Kapsel mit Ni-Membran (rot) und goldbeschichteter PET-Membran (blau), Anregungssignal Burst $+2\text{ V}$, Abtastung in der Membranmitte	68
4.20.	Amplitudenverteilung M296 und MK102 mit individueller Speisespannung bei $\sin 1\text{ kHz}$, $4 V_{pp}$, glockenförmige Schwingung	69
4.21.	links: Ausbildung der ersten Mode bei MK102, rechts: Flächendiagonale, Signal: $\sin 1\text{ kHz}$, $4 V_{pp}$	69
4.22.	links: Ausbildung der zweiten Mode bei MK102, rechts: Flächendiagonale, Signal: $\sin 22.5\text{ kHz}$, $4 V_{pp}$	70
4.23.	Darstellung der Schwingungsmaxima (rot) einer MK221 bei jeweils einer Frequenz, Anregung: Chirp-Signal $2 V_{pp}$, Flächenscan	71
4.24.	Darstellung der Schwingungsmaxima (rot) einer MK221 bei jeweils einer Frequenz, Zeigerscan, Anregung: Chirp-Signal $2 V_{pp}$, Auswertung nach der Zeigermethode	72
4.26.	Schablone für die Bedampfung der segmentierten Membranen mit dickerer Goldschicht im Winkel von 10° , 20° , 40° , 90° von MTG	73
4.25.	Membran mit 10° -Sektor, MTG	73

5.1. optische Messungen am MK221 in der Membranmitte (blau) und am Membranrand (rot), Übertragungsfunktion, Burst-Signal 1 V_{pp}	75
5.2. Doppelelektrode, vorne (links), hinten (rechts), elektrisch isoliert: Rand, Ring, Mitte	76
5.3. Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons	77
A.1. Technische Daten, M296, MTG	98
A.2. Technische Daten, MK301, MTG	99
A.3. Dreieckskapsel, Ehrlund	100
A.4. Amplituden- Frequenzgang der Dreieckskapsel, Ehrlund	100
A.5. Rechteckskapsel ELMC, Pearl	101
A.6. Amplituden- Frequenzgang Rechteckskapsel, Pearl ELMC	101
A.7. KM184, Neumann	102
A.8. Amplituden- Frequenzgang des KM184, Neumann	102
A.9. M300, Microtech Gefell	103
A.10. Amplituden- Frequenzgang des M300, MTG	103
A.11. M70 Nickel- (links) und PET-Membran (rechts), Microtech Gefell	104
A.12. Amplituden- Frequenzgang des M70 mit Nickelmembran, MTG	104
A.13. Amplituden- Frequenzgang des M70 PET, MTG	105
A.14. M71 PET-Membran asymmetrisch (links) und symmetrisch (rechts), MTG	106
A.15. Amplituden- Frequenzgang des M71 PET - symmetrisch, MTG	106
A.16. Amplituden- Frequenzgang des M71 PET - asymmetrisch, MTG	107
A.17. M71 PVC-Membran symmetrisch, Microtech Gefell	108
A.18. Amplituden- Frequenzgang des M71 PVC - symmetrisch, MTG	108
A.19. C414B ULS, AKG	109
A.20. Amplituden- Frequenzgang des C414, AKG	109
A.21. U87Ai, Neumann	110
A.22. Amplituden- Frequenzgang des U87Ai, Neumann	110
A.23. M930, Microtech Gefell	111
A.24. Amplituden- Frequenzgang des M930, MTG	111
A.25. Mikrofon-Ausrichtung am Bösendorfer Flügel	112
A.26. Mikrofon-Ausrichtung vor dem Geithain Lautsprecher	112
A.27. STEP-Bedienoberfläche zur Durchführung der Hörtests	113
B.1. Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 1	114
B.2. Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 2	114
B.3. Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 3	115
B.4. Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 4	115
B.5. Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 5	115
B.6. Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Eddi"	117
B.7. Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Eddi"	117
B.8. Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Hancock"	118
B.9. Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Hancock"	118
B.10. Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Speech"	119

B.11.	Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Speech"	119
B.12.	Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Stravinsky"	120
B.13.	Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel "Stravinsky"	120
B.14.	Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, über alle Klangbeispiele	121
B.15.	Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen	121
B.16.	Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Eddi"	122
B.17.	Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Eddi"	122
B.18.	Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Hancock"	123
B.19.	Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Hancock"	123
B.20.	Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Speech"	124
B.21.	Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Speech"	124
B.22.	Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Stravinsky"	125
B.23.	Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel "Stravinsky"	125
B.24.	Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, über alle Klangbeispiele	126
B.25.	Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen	126
B.26.	Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Eddi"	127
B.27.	Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Eddi"	127
B.28.	Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Hancock"	128
B.29.	Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Hancock"	128
B.30.	Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Speech"	129
B.31.	Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Speech"	129
B.32.	Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Stravinsky"	130
B.33.	Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel "Stravinsky"	130
B.34.	Bewertung, Attribut: Nähe, über alle Klangbeispiele	131
B.35.	Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen	131
B.36.	Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Eddi"	132
B.37.	Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Eddi"	132
B.38.	Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Hancock"	133
B.39.	Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Hancock"	133
B.40.	Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Speech"	134
B.41.	Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Speech"	134
B.42.	Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Stravinsky"	135
B.43.	Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel "Stravinsky"	135
B.44.	Bewertung, Attribut: Transparenz, über alle Klangbeispiele	136
B.45.	Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen	136
B.46.	Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel "Eddi"	137
B.47.	Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel "Hancock"	138
B.48.	Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel "Speech"	138
B.49.	Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel "Stravinsky"	139

B.50. Bewertung allgemeines Ranking, über alle Klangbeispiele	139
C.1. MK301, Referenz, Polarisationsspannung 200 V	140
C.2. MK221, Referenz, Polarisationsspannung 200 V	140
C.3. MK102, Referenz, Polarisationsspannung 200V	141
C.4. MK102, Referenz, Polarisationsspannung 80 V	141
C.5. M296, Polarisationsspannung 80 V	141
C.6. M7 sym, #7401, + 2 V Burst-Anregung	142
C.7. M7 asym, #7802, + 2 V Burst-Anregung	142
C.8. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 100 Hz - 315 Hz	143
C.9. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 400 Hz - 1250 Hz	144
C.10. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 1600 Hz - 5000 Hz	145
C.11. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 6300 Hz - 20000 Hz	146
C.12. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 22500 Hz	147
C.13. Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 25000 Hz	148
D.1. Bode-Diagramm des neu entwickelten Hochvolt-Verstärkers (Dipl.-Ing. Thaden Cohrs)	149
D.2. elektrische Daten des Hochvolt-Verstärkers	149
D.3. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: schwach	150
D.4. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: mittel	150
D.5. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: stark	150
D.6. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: schwach	151
D.7. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: mittel	151
D.8. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: stark	151
D.9. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: schwach	152
D.10. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: mittel	152
D.11. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: stark	152
D.12. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: schwach	153
D.13. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: mittel	153
D.14. Material: Nickel, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: stark	153
D.15. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: schwach	154
D.16. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: mittel	154
D.17. Material: Nickel, Dicke 4 µm, mechanische Spannung: stark	154
D.18. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: schwach	155
D.19. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: mittel	155
D.20. Material: Edelstahl, Dicke 2 µm, mechanische Spannung: stark	155
D.21. Übertragungsfunktion M71 sym, optische Messung, Chirp	156
D.22. Übertragungsfunktion M71 asym, optische Messung, Chirp	156
D.23. M71-Kapsel, Goldsegment 10°	157
D.24. M71-Kapsel, Goldsegment 20°	157
D.25. M71-Kapsel, Goldsegment 40°	158
D.26. M71-Kapsel, Goldsegment 90°	158
D.27. Segmentierte Elektrode mit einem Verstärker	159

D.28.Segmentierte Elektrode mit zwei Verstärkern	159
D.29.Kapsel des Doppelelektroden-Mikrofons	160
D.30.Verstärker des Doppelelektroden-Mikrofons	160
D.31.Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons, "Mitte" . . .	161
D.32.Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons, "Ring" . . .	161
D.33.Polardiagramme des Doppelelektroden Mikrofons, 250 Hz - 4 kHz	162
D.34.Polardiagramme des Doppelelektroden Mikrofons, 4 - 20 kHz	162

A. Prüflinge und Aufbau der Hörtests

A.1. M296, Microtech Gefell

Technische Daten M 296

CE Zertifikat

Kondensator Studiomikrofon mit kugelförmiger Richtcharakteristik

Richtcharakteristik		Kugel
Akustische Arbeitsweise		Druckempfänger
Übertragungsbereich		20 ... 20000 Hz \pm 2,5 dB
Feldbetriebsübertragungsfaktor bei 1 kHz		15 mV/Pa
Schalterstellung "Tiefenabsenkung" bei 90 Hz		-10 dB
Nennimpedanz		150 Ω
Ersatzgeräuschpegel	CCIR 468-4	22 dB
	DIN EN 60 651	14 dB - A
Geräuschpegelabstand	CCIR-bewertet	72 dB
(bez. auf 1 Pa bei 1 kHz)	A-bewertet	80 dB
Grenzschalldruckpegel für 0,5 % Klirrfaktor		134 dB
mit Vordämpfung		144 dB
Dynamikumfang des Mikrofonverstärkers		120 dB
Stromaufnahme (P 48, DIN 45596, IEC 268-15)		3 mA
Anschlussarmatur		XLR-Steckverbinder 3-polig Kontakte vergoldet
Gewicht		157 g
Abmessungen (L x \varnothing)		156 mm x 21/24 mm

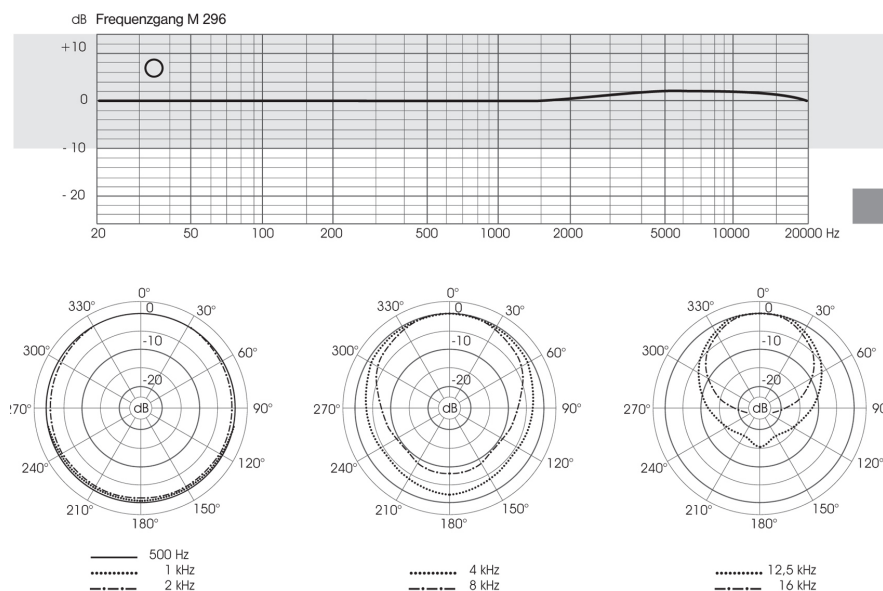


Abbildung A.1.: Technische Daten, M296, MTG

A.2. MK301, Microtech Gefell

Technische Daten/Specifications MK 301

21.31
96.124

PTB-Zulassung-Nr.
zur amtlichen Eichung

CE

Wandlertyp
Transducer type

Kapazitiver Druckempfänger
Capacitive pressure transducer

*Frequenzbereich des Freifeldübertragungsmaßes ohne Schutzkappe
*Frequency range free field response without protection grid

5 Hz ... 100 kHz, (± 2 dB)

*Feld-Leerlauf-Übertragungsfaktor/Sensitivity

5 mV/Pa

Grenzschalldruckpegel für 3 % Klirrfaktor bei 1 kHz

168 dB

Max. SPL for THD $\leq 3\%$ at 1 kHz

Eigenrauschen mit Vorverstärker MV 302

35 dBA

Inherent noise with preamplifier MV 302

Polarisationsspannung/Polarization voltage

200 V

*Kapazität mit Polarisationsspannung bei 1 kHz

6,8 pF

*Polarized cartridge capacitance at 1 kHz

Arbeitstemperaturbereich

-50 ... +110 °C

Operating temperature range

Temperaturkoeffizient

$\leq 0,01$ dB/K

Main ambient temperature coefficient

Statischer Druckkoeffizient

-1×10^{-5} dB/Pa

Main ambient pressure coefficient

Durchmesser/Diameter

mit Schutzkappe/with protection grid

$7,0 \pm 0,02$ mm

ohne Schutzkappe/without protection grid

$6,35 \pm 0,02$ mm

Höhe/Height

9,7 mm

Gewicht/Weight

2 g

Gewinde für Vorverstärker/Preamplifier thread

5,7 mm 60 UNS

Gewinde für Schutzkappe/Protection grid thread

6,35 mm 60 UNS

Wartung und Instandhaltung

Zur Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit ist die Messmikrofonkapsel vor mechanischen Beschädigungen zu schützen und in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen in festzulegenden Intervallen im betriebsspannungsfreien Zustand allseitig auf Verschmutzung zu überprüfen.

Nach Entfernen der Schutzkappe sind die Verunreinigungen in deren Innenraum sowie auf der Membran äußerst vorsichtig mit einem weichen Pinsel oder Tuch zu entfernen.

Die Messmikrofonkapsel ist nicht für den Einsatz in chemisch aggressiven Medien und leitendem Staub geeignet. Kondensatbildung ist auszuschließen.

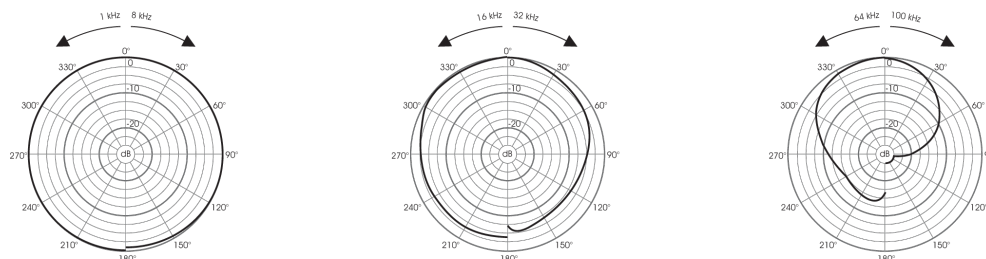
Maintenance and upkeep

In order to maintain its functioning the measurement microphone cartridge should be protected against mechanical damage. It should be disconnected from its power source and completely checked for any pollution in regular intervals that have to be defined depending on the operating conditions.

After removal of the protection grid the pollution within the grid and on the diaphragm should be cleaned very carefully with a soft clean cloth or brush.

The measurement microphone cartridge is not suitable for use in chemical aggressive conditions and in conductible dust. Condensation must be avoided.

Polardiagramme/Polar patterns



Frequenzgänge/Frequency responses

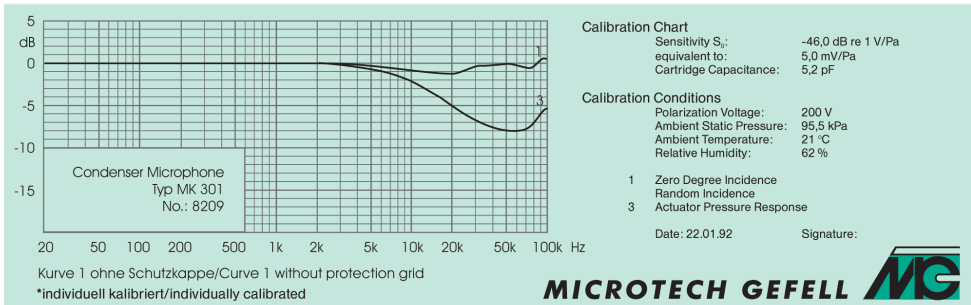


Abbildung A.2.: Technische Daten, MK301, MTG

A.3. Dreieckskapsel, Ehrlund

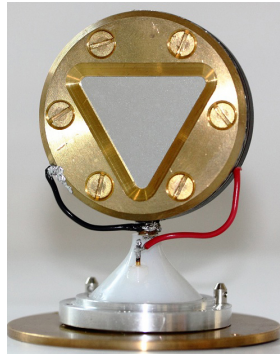


Abbildung A.3.: Dreieckskapsel, Ehrlund

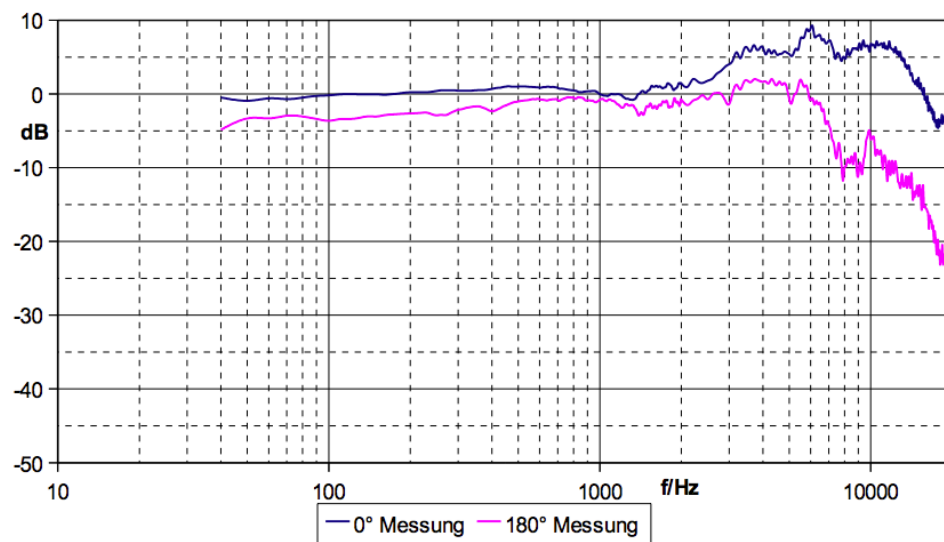


Abbildung A.4.: Amplituden- Frequenzgang der Dreieckskapsel, Ehrlund

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	23 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	7 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	135 dB

Tabelle A.1.: Parameter der Dreieckskapsel, Ehrlund

A.4. Rechteckskapsel ELMC, Pearl



Abbildung A.5.: Rechteckskapsel ELMC, Pearl

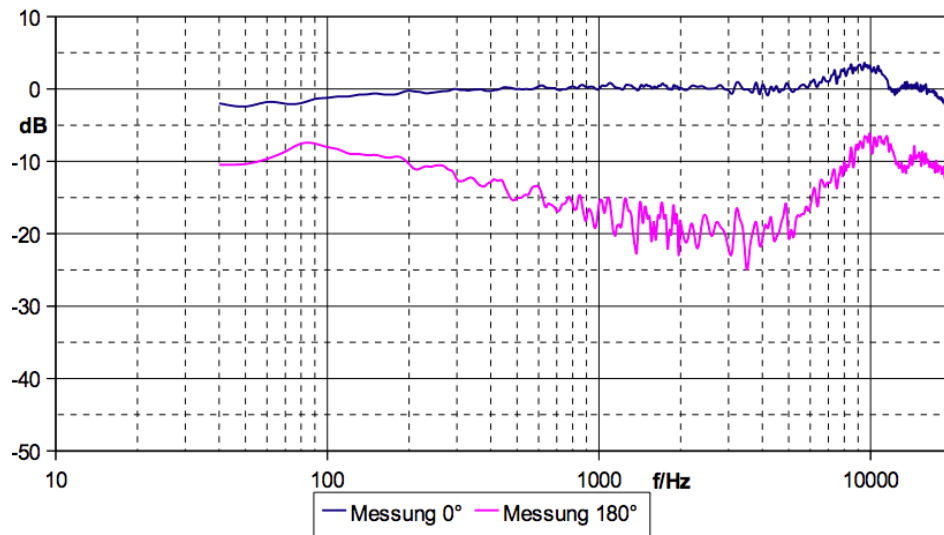


Abbildung A.6.: Amplituden- Frequenzgang Rechteckskapsel, Pearl ELMC

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	22 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	10 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	126 dB

Tabelle A.2.: Parameter der Rechteckskapsel, ELMC

A.5. KM184, Neumann



Abbildung A.7.: KM184, Neumann

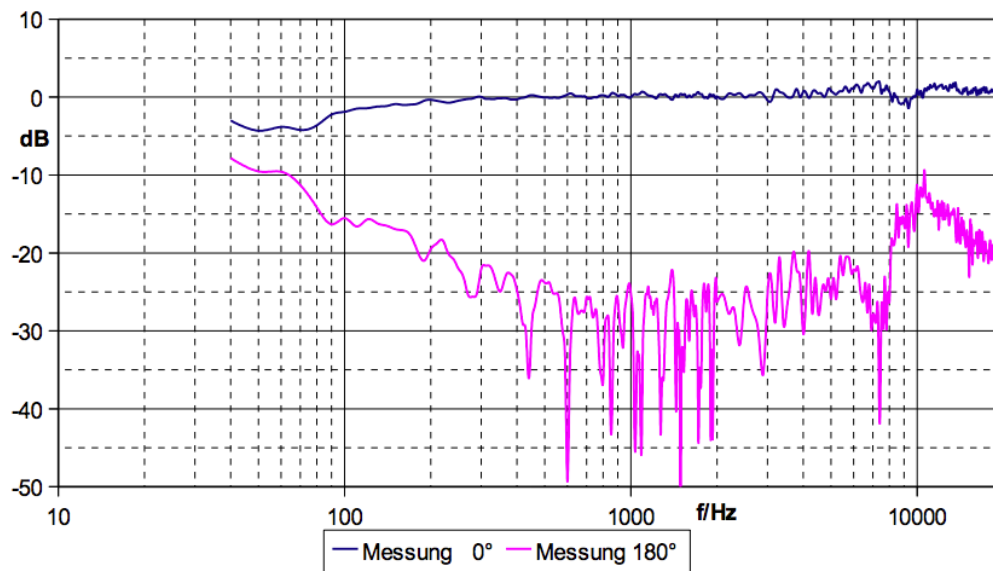


Abbildung A.8.: Amplituden- Frequenzgang des KM184, Neumann

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	15 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	13 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	138 dB

Tabelle A.3.: Parameter des KM184, Neumann

A.6. M300, Microtech Gefell



Abbildung A.9.: M300, Microtech Gefell

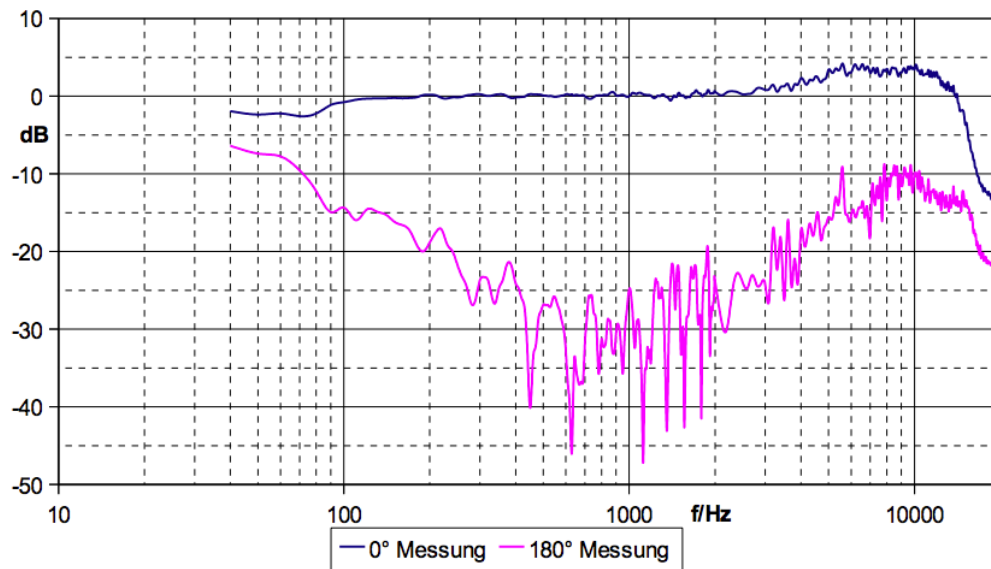


Abbildung A.10.: Amplituden- Frequenzgang des M300, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	12 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	16 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	147 dB

Tabelle A.4.: Parameter des M300, MTG

A.7. M70 Nickelmembran, Microtech Gefell



Abbildung A.11.: M70 Nickel- (links) und PET-Membran (rechts), Microtech Gefell

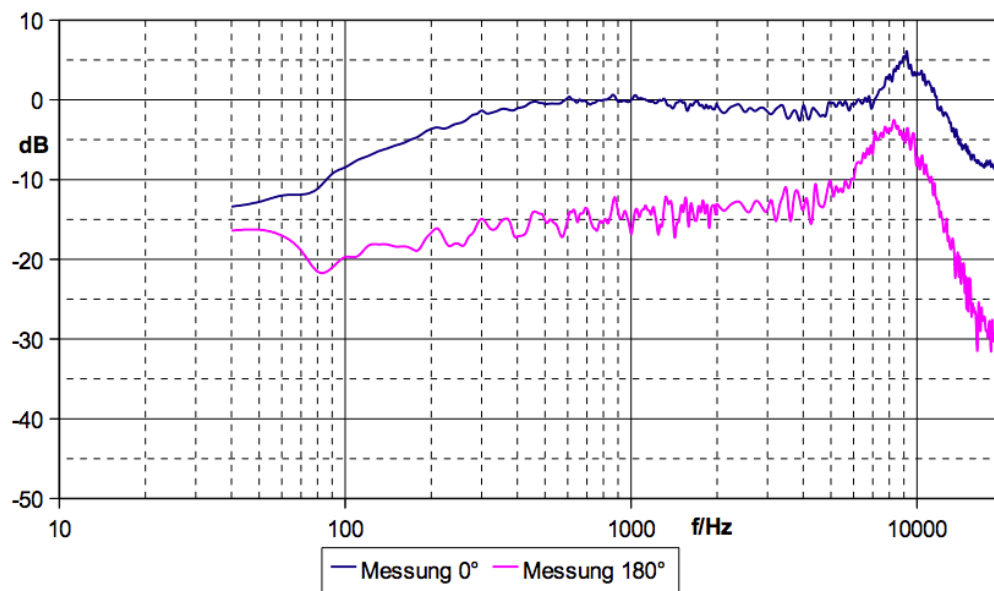


Abbildung A.12.: Amplituden- Frequenzgang des M70 mit Nickelmembran, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	15 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	-
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	-

Tabelle A.5.: Parameter des M70 Nickel, MTG

A.8. M70 PET-Membran, Microtech Gefell

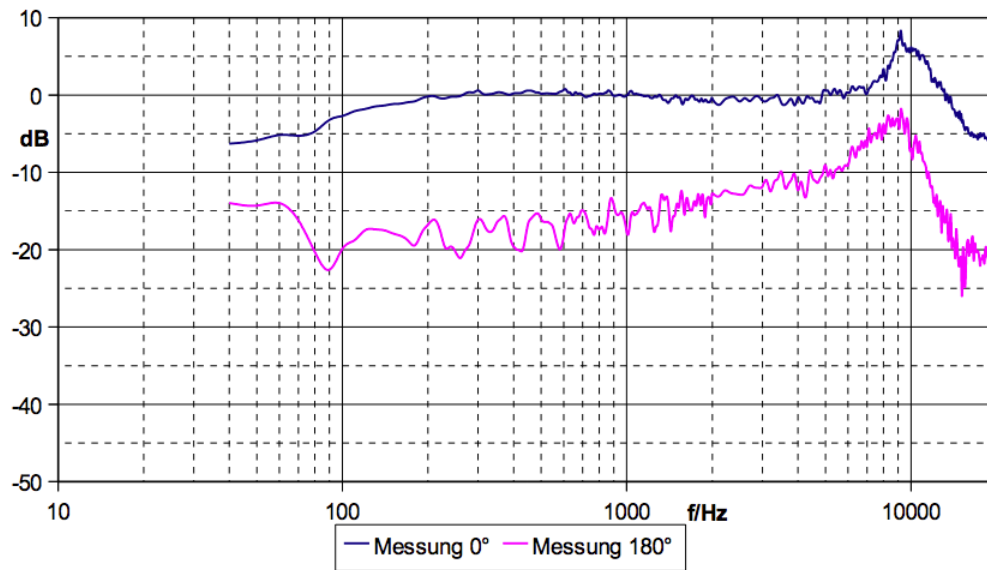


Abbildung A.13.: Amplituden- Frequenzgang des M70 PET, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	13 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	-
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	-

Tabelle A.6.: Parameter des M70 PET, MTG

A.9. M71 PET-Membran symmetrisch, Microtech Gefell



Abbildung A.14.: M71 PET-Membran asymmetrisch (links) und symmetrisch (rechts), MTG

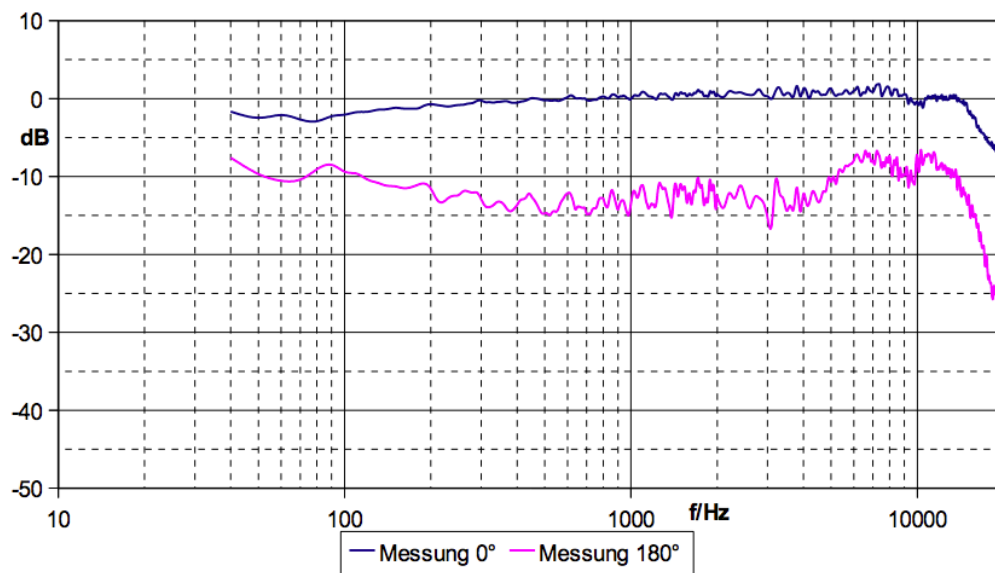


Abbildung A.15.: Amplituden- Frequenzgang des M71 PET - symmetrisch, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	9 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	-
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	-

Tabelle A.7.: Parameter des M71 PET - symmetrisch, MTG

A.10. M71 PET-Membran asymmetrisch, Microtech Gefell

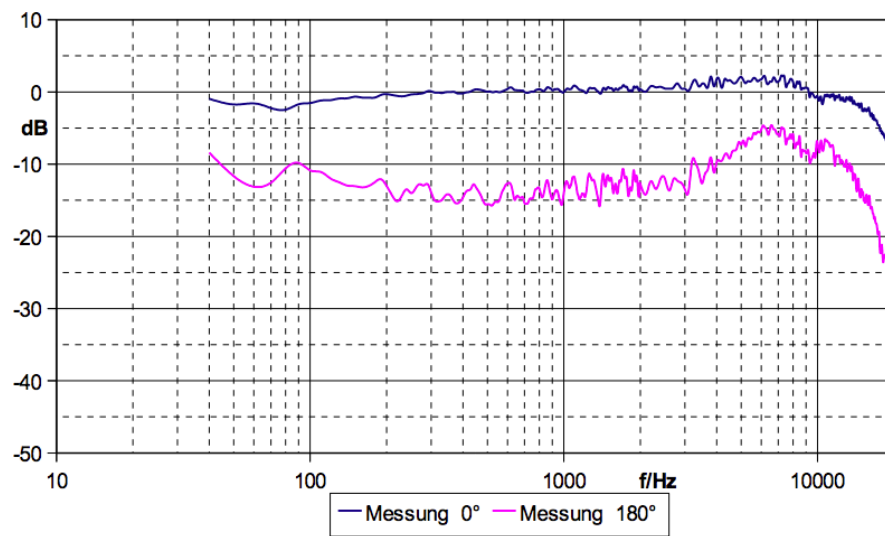


Abbildung A.16.: Amplituden- Frequenzgang des M71 PET - asymmetrisch, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	9 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	-
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	-

Tabelle A.8.: Parameter des M71 PET - asymmetrisch, MTG

A.11. M71 PVC-Membran symmetrisch, Microtech Gefell



Abbildung A.17.: M71 PVC-Membran symmetrisch, Microtech Gefell

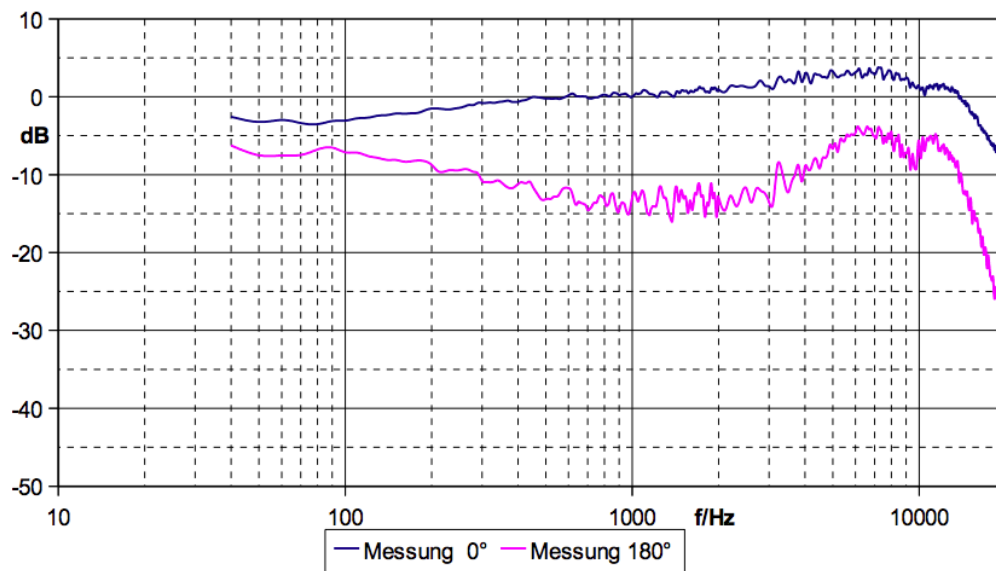


Abbildung A.18.: Amplituden- Frequenzgang des M71 PVC - symmetrisch, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	9 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	-
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	-

Tabelle A.9.: Parameter des M71 PVC - symmetrisch, MTG

A.12. C414B ULS, AKG



Abbildung A.19.: C414B ULS, AKG

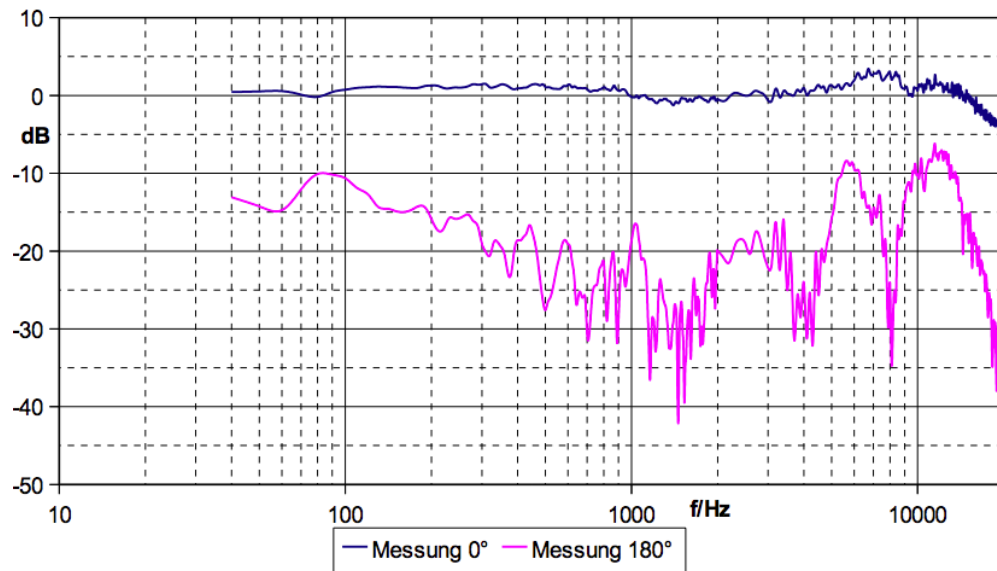


Abbildung A.20.: Amplituden- Frequenzgang des C414, AKG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	12,5 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	14 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	126 dB

Tabelle A.10.: Parameter des C414, AKG

A.13. U87Ai, Neumann



Abbildung A.21.: U87Ai, Neumann

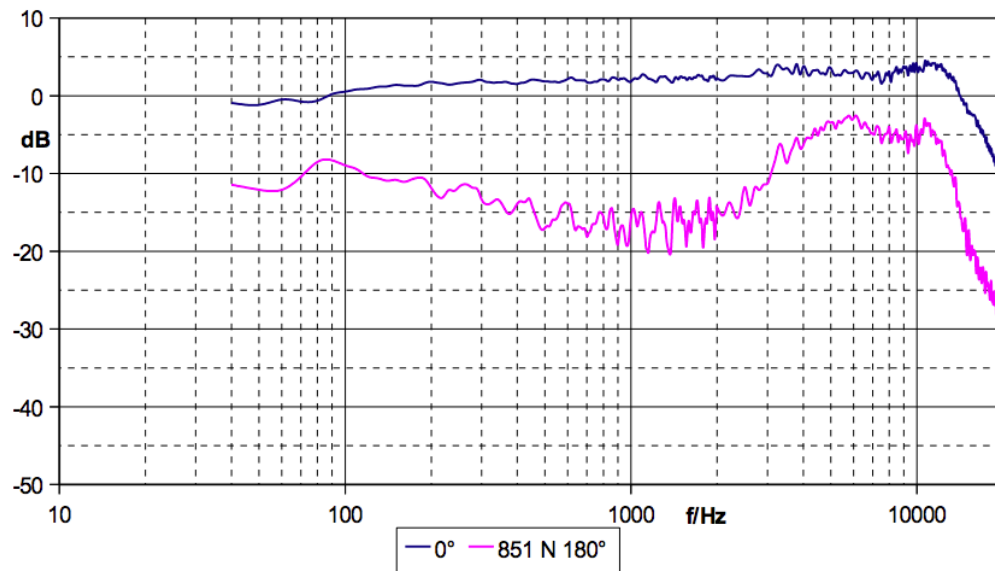


Abbildung A.22.: Amplituden- Frequenzgang des U87Ai, Neumann

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	22 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	12 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	117 dB

Tabelle A.11.: Parameter des U87Ai, Neumann

A.14. M930, Microtech Gefell



Abbildung A.23.: M930, Microtech Gefell

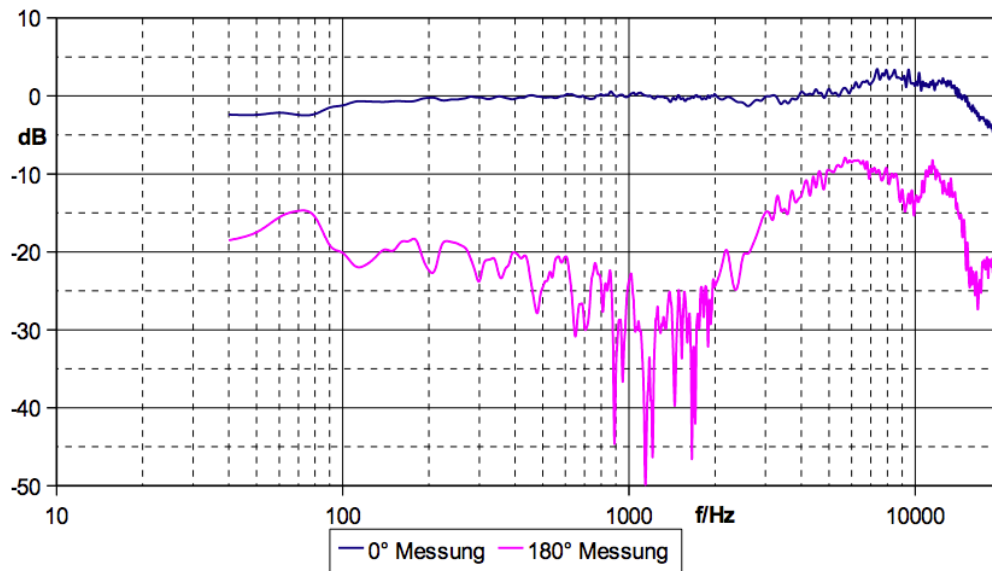


Abbildung A.24.: Amplituden- Frequenzgang des M930, MTG

Parameter	Wert
Übertragungsfaktor M_0	21 mV/Pa
Ersatzgeräuschpegel	7 db(A)
Grenzschalldruckpegel (0,5%)	142 dB

Tabelle A.12.: Parameter des M930, MTG

A.15. Aufnahme- und Wiedergabesetups

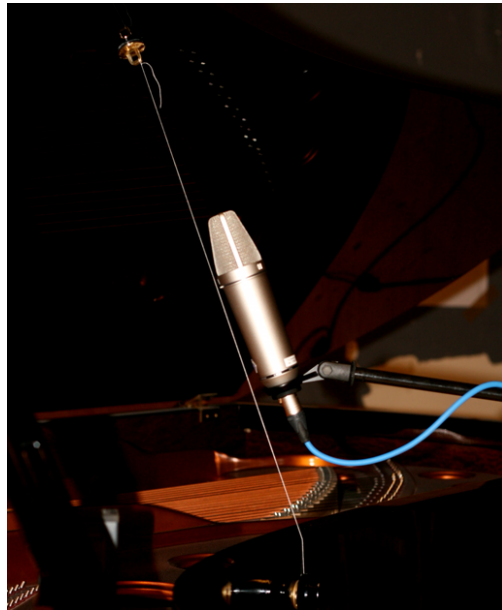


Abbildung A.25.: Mikrofonausrichtung am Bösendorfer Flügel



Abbildung A.26.: Mikrofonausrichtung vor dem Geithain Lautsprecher

A.16. STEP-Software

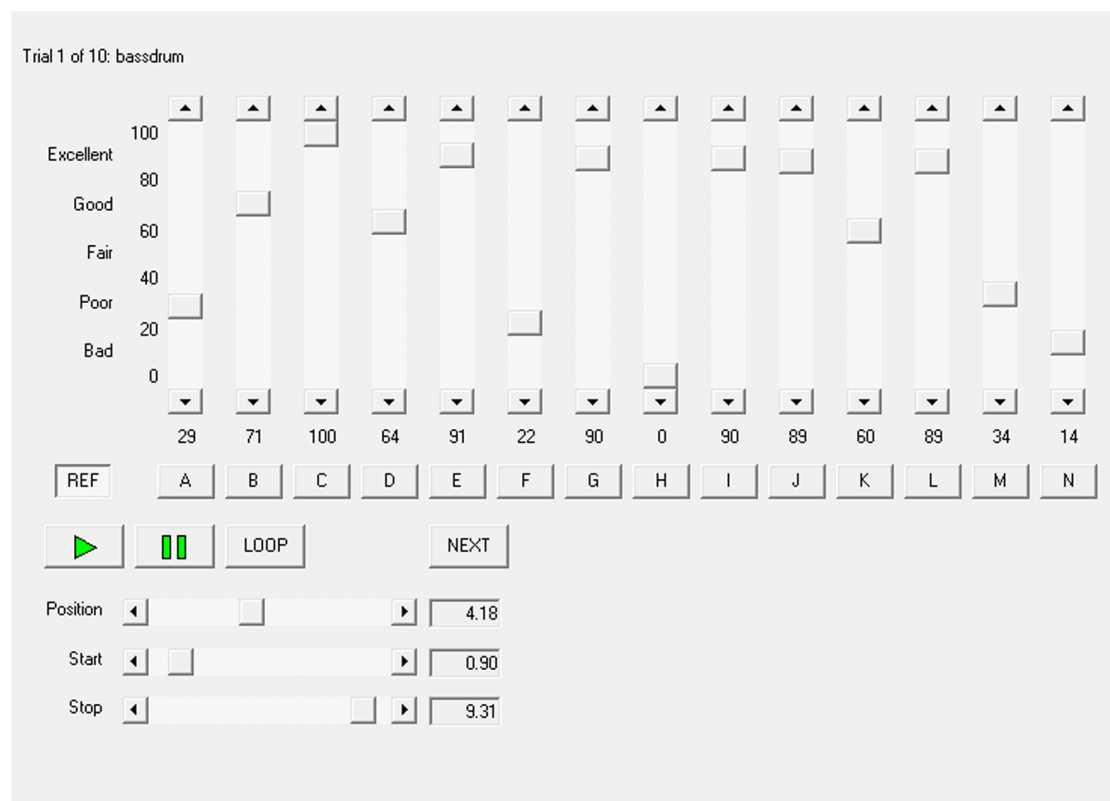


Abbildung A.27.: STEP-Bedienoberfläche zur Durchführung der Hörtests

B. Ergebnisse der Hörtests (Auszug)

B.1. Clusterbildung

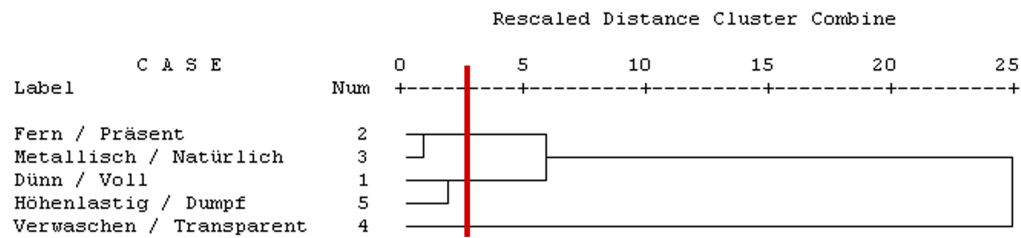


Abbildung B.1.: Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 1

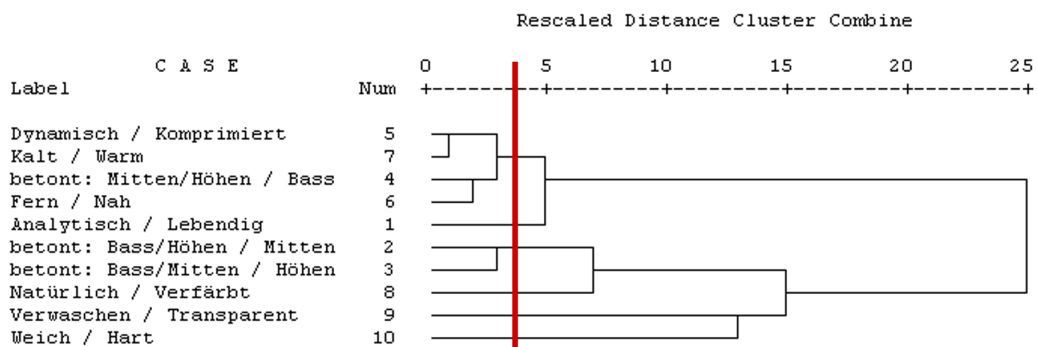


Abbildung B.2.: Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 2

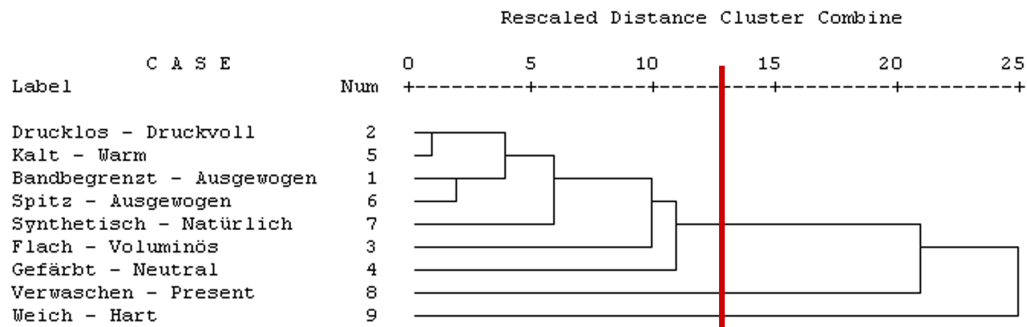


Abbildung B.3.: Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 3

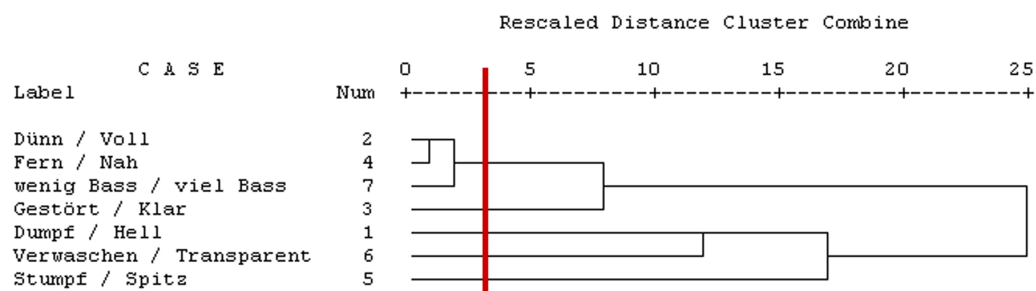


Abbildung B.4.: Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 4

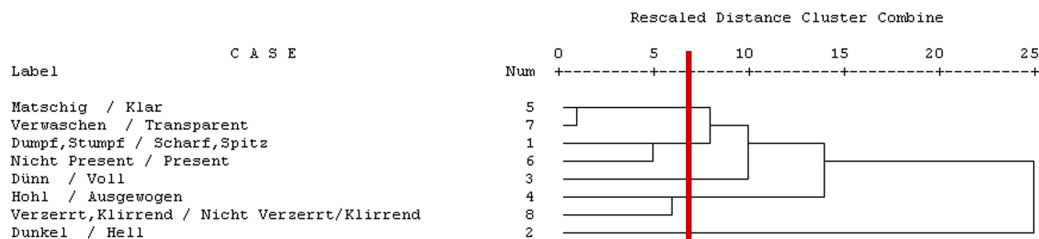


Abbildung B.5.: Dendrogramm zur Evaluierung der Attribute für den Hörtest, Proband 5

B.2. Levene-Tests

Klangbeispiel	F	df1	df2	Sig.	F_{max} -Wert
Eddi	1,655	13	210	0,073	-
Hancock	1,911	13	210	0,030	5,550
Speech	0,741	13	210	0,721	-
Stravinsky	1,709	13	210	0,061	-
Design: Konst. Term + Mic					

Tabelle B.1.: Levene-Test, Attribut: Bass/Höhen-Balance

Klangbeispiel	F	df1	df2	Sig.	F_{max} -Wert
Eddi	3,112	13	210	0,000	13,854
Hancock	1,725	13	210	0,058	-
Speech	1,704	13	210	0,062	-
Stravinsky	1,826	13	210	0,042	4,374
Design: Konst. Term + Mic					

Tabelle B.2.: Levene-Test, Attribut: Natürlichkeit

Klangbeispiel	F	df1	df2	Sig.	F_{max} -Wert
Eddi	1,332	13	210	0,196	-
Hancock	1,097	13	210	0,363	-
Speech	1,222	13	210	0,265	-
Stravinsky	1,536	13	210	0,107	-
Design: Konst. Term + Mic					

Tabelle B.3.: Levene-Test, Attribut: Nähe

Klangbeispiel	F	df1	df2	Sig.	F_{max} -Wert
Eddi	1,416	13	210	0,154	-
Hancock	2,514	13	210	0,003	6,413
Speech	2,589	13	210	0,002	3,026
Stravinsky	1,392	13	210	0,165	-
Design: Konst. Term + Mic					

Tabelle B.4.: Levene-Test, Attribut: Transparenz

B.3. Bewertungen/Signifikanztabellen

B.3.1. Bass/Höhen-Balance

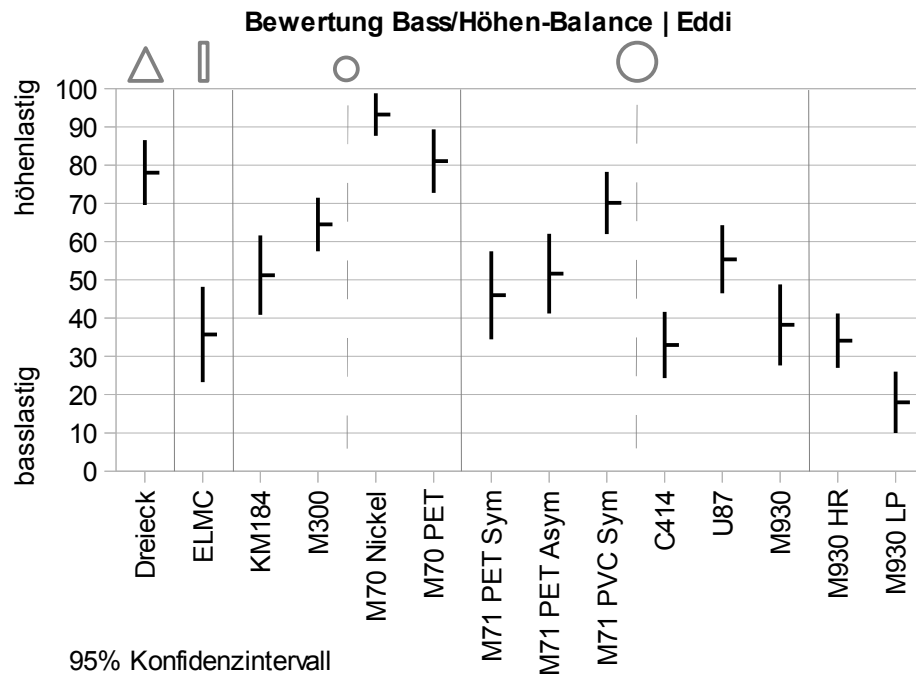


Abbildung B.6.: Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Eddi”

ANOVA	Paarweise Vergleiche			Attribut: Bass/Höhen-Balance					Klangbeispiel: Eddi					
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,006	1,000	1,000	1,000	,000	,008	1,000	,000	,064	,000	,000	,000
ELMC ^a	,000		1,000	,002	,000	,000	1,000	1,000	,000	1,000	,300	1,000	1,000	,704
KM184 ^a	,006	1,000		1,000	,000	,001	1,000	1,000	,425	,564	1,000	1,000	,923	,000
M300 ^a	1,000	,002	1,000		,002	1,000	,504	1,000	1,000	,000	1,000	,009	,001	,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	,002		1,000	,000	,000	,051	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	,000	,001	1,000	1,000		,000	,001	1,000	,000	,012	,000	,000	,000
M71 PET Sym ^a	,000	1,000	1,000	,504	,000	,000		1,000	,030	1,000	1,000	1,000	1,000	,003
M71 PET ASym ^a	,008	1,000	1,000	1,000	,000	,001	1,000		,504	,476	1,000	1,000	,785	,000
M71 PVC Sym ^a	1,000	,000	,425	1,000	,051	1,000	,030	,504		,000	1,000	,000	,000	,000
C414 ^a	,000	1,000	,564	,000	,000	,000	1,000	,476	,000		,076	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,064	,300	1,000	1,000	,000	,012	1,000	1,000	1,000	,076		,923	,135	,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	,009	,000	,000	1,000	1,000	,000	1,000	,923		1,000	,222
M930 HR ^a	,000	1,000	,923	,001	,000	,000	1,000	,785	,000	1,000	,135	1,000		1,000
M930 LP ^a	,000	,704	,000	,000	,000	,000	,003	,000	,000	1,000	,000	,222	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

α-Niveau: 0,05

Abbildung B.7.: Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Eddi”

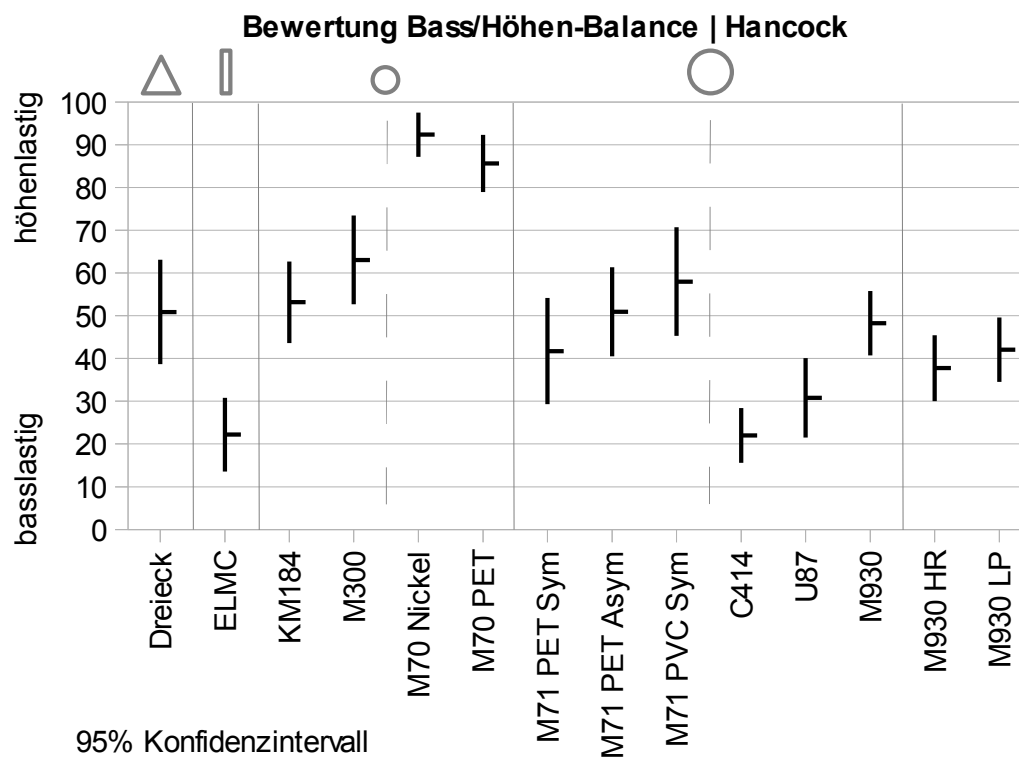


Abbildung B.8.: Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Hancock”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Bass/Höhen-Balance					Klangbeispiel: Hancock				
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,003	1,000	1,000	,000	,000	1,000	1,000	1,000	,002	,292	1,000	1,000	1,000
ELMC ^a	,003		,001	,000	,000	,000	,368	,003	,000	1,000	1,000	,013	1,000	,319
KM184 ^a	1,000	,001		1,000	,000	,000	1,000	1,000	1,000	,001	,095	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	1,000	,000	1,000		,002	,086	,161	1,000	1,000	,000	,000	1,000	,020	,187
M70 Nickel ^a	,000	,000	,000	,002		1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	,000	,000	,000	,086	1,000		,000	,005	,000	,000	,000	,000	,000	,000
M71 PET Sym ^a	1,000	,368	1,000	,161	,000	,000		1,000	,337	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	1,000	,003	1,000	1,000	,000	,000	1,000		,002	,284	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	1,000	,000	1,000	1,000	,000	,005	1,000	1,000		,007	1,000	,268	1,000	1,000
C414 ^a	,002	1,000	,001	,000	,000	,000	,337	,002	,000		1,000	,012	1,000	,292
U87 ^a	,292	1,000	,095	,000	,000	,000	1,000	,284	,007	1,000		,931	1,000	1,000
M930 ^a	1,000	,013	1,000	1,000	,000	,000	1,000	1,000	1,000	,012	,931		1,000	1,000
M930 HR ^a	1,000	1,000	1,000	,020	,000	,000	1,000	1,000	,268	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	1,000	,319	1,000	,187	,000	,000	1,000	1,000	,292	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.9.: Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Hancock”

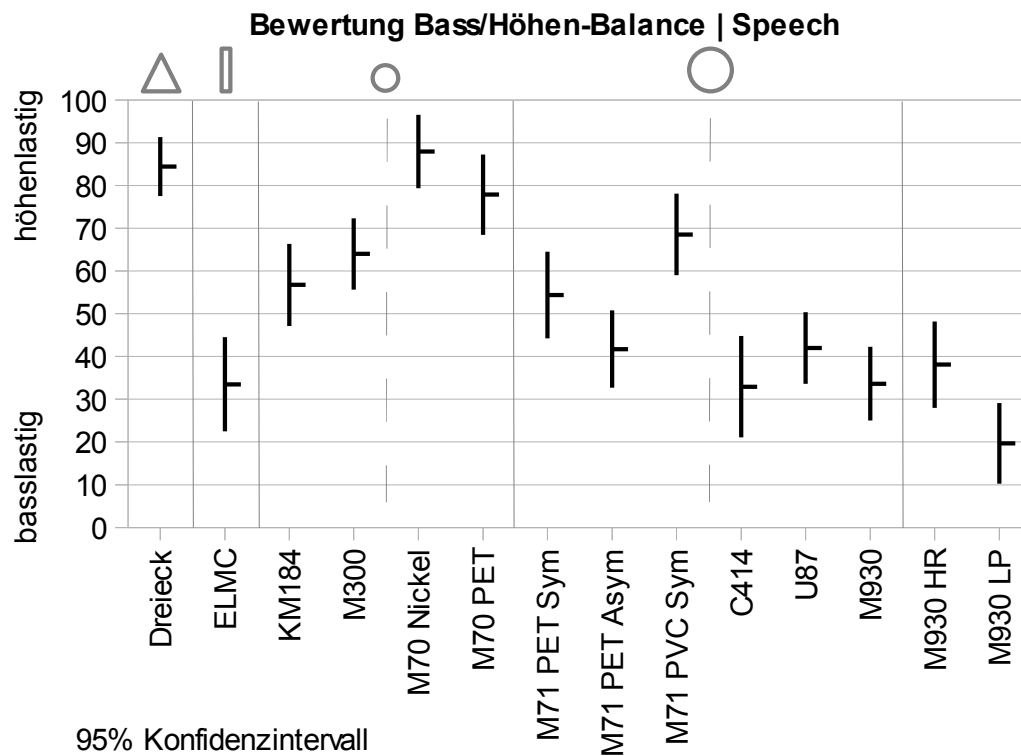


Abbildung B.10.: Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Speech”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Bass/Höhen-Balance					Klangbeispiel: Speech				
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,006	,271	1,000	1,000	,001	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000
ELMC ^a	,000		,069	,001	,000	,000	,221	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,006	,069		1,000	,001	,196	1,000	1,000	1,000	,051	1,000	,073	,609	,000
M300 ^a	,271	,001	1,000		,048	1,000	1,000	,114	1,000	,001	,128	,001	,017	,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,001	,048		1,000	,000	,000	,438	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	,000	,196	1,000	1,000		,060	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
M71 PET Sym ^a	,001	,221	1,000	1,000	,000	,060		1,000	1,000	,169	1,000	,234	1,000	,000
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	,114	,000	,000	1,000		,010	1,000	1,000	1,000	1,000	,125
M71 PVC Sym ^a	1,000	,000	1,000	1,000	,438	1,000	1,000	,010		,000	,011	,000	,001	,000
C414 ^a	,000	1,000	,051	,001	,000	,000	,169	1,000	,000		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,000	1,000	1,000	,128	,000	,000	1,000	1,000	,011	1,000		1,000	1,000	,110
M930 ^a	,000	1,000	,073	,001	,000	,000	,234	1,000	,000	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,000	1,000	,609	,017	,000	,000	1,000	1,000	,001	1,000	1,000	1,000		,660
M930 LP ^a	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,125	,000	1,000	,110	1,000	,660		

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.11.: Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Speech”

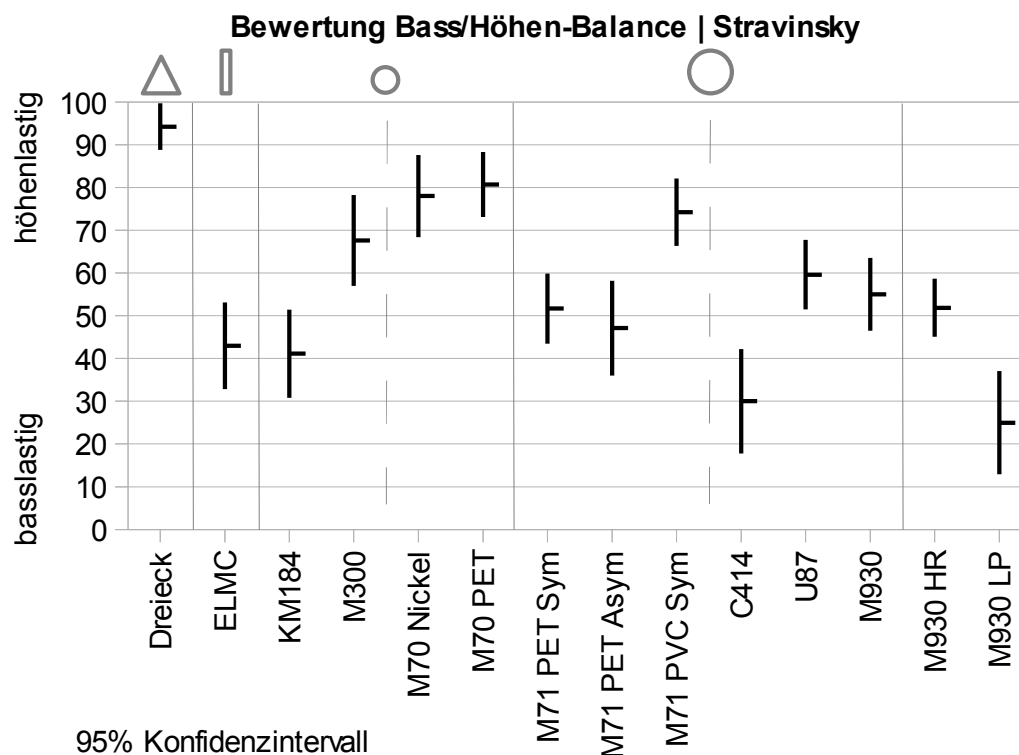


Abbildung B.12.: Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Stravinsky”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Bass/Höhen-Balance					Klangbeispiel: Stravinsky				
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,000	,010	1,000	1,000	,000	,000	,319	,000	,000	,000	,000	,000
ELMC ^a	,000		1,000	,032	,000	,000	1,000	1,000	,001	1,000	1,000	1,000	1,000	,771
KM184 ^a	,000	1,000		,011	,000	,000	1,000	1,000	,000	1,000	,622	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,010	,032	,011		1,000	1,000	1,000	,253	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	1,000		1,000	,012	,001	1,000	,000	,657	,074	,014	,000
M70 PET ^a	1,000	,000	,000	1,000	1,000		,003	,000	1,000	,000	,194	,018	,003	,000
M71 PET Sym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,012	,003		1,000	,093	,143	1,000	1,000	1,000	,010
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	,253	,001	,000	1,000		,008	1,000	1,000	1,000	1,000	,116
M71 PVC Sym ^a	,319	,001	,000	1,000	1,000	1,000	,093	,008		,000	1,000	,448	,102	,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	,000	,000	,000	,143	1,000	,000		,002	,026	,131	1,000
U87 ^a	,000	1,000	,622	1,000	,657	,194	1,000	1,000	1,000	,002		1,000	1,000	,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,074	,018	1,000	1,000	,448	,026	1,000		1,000	,001
M930 HR ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,014	,003	1,000	1,000	,102	,131	1,000	1,000		,009
M930 LP ^a	,000	,771	1,000	,000	,000	,000	,010	,116	,000	1,000	,000	,001	,009	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.13.: Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Klangbeispiel “Stravinsky”

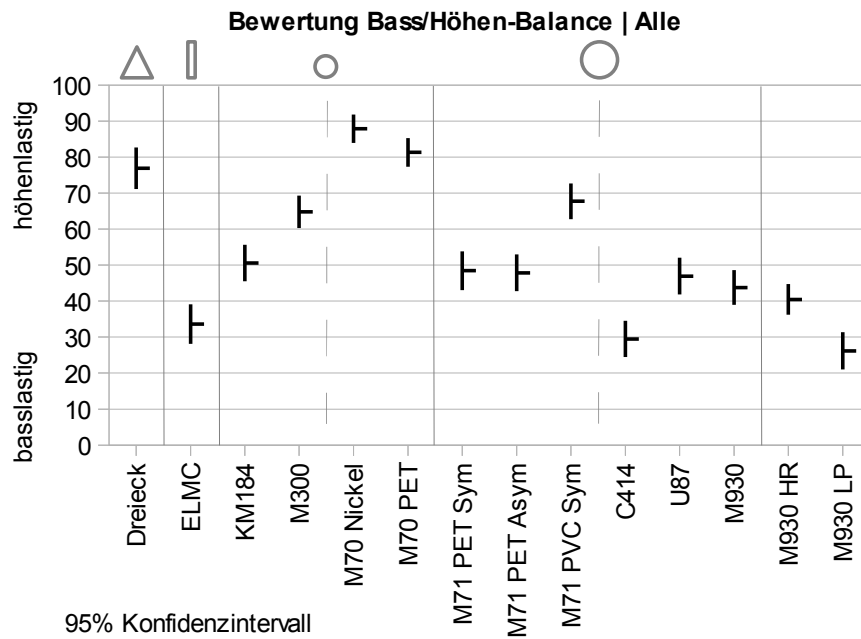


Abbildung B.14.: Bewertung, Attribut: Bass/Höhen-Balance, über alle Klangbeispiele

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Bass/Höhen-Balance			
Mikrofon Klangbeispiel	Eddi	Hancock	Speech	Stravinsky				
Dreieck								
Eddi ^a		,000	1,000	,070				
Hancock ^a	,000		,000	,000				
Speech ^a	1,000	,000		,721				
Stravinsky ^a	,070	,000	,721					
U87								
Eddi ^a		,001	,222	1,000				
Hancock ^a	,001		,476	,000				
Speech ^a	,222	,476		,040				
Stravinsky ^a	1,000	,000	,040					
M930								
Eddi ^a		,745	1,000	,068				
Hancock ^a	,745		,157	1,000				
Speech ^a	1,000	,157		,009				
Stravinsky ^a	,068	1,000	,009					
Basiert auf den geschätzten Randmitteln								
a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni								
α-Niveau: 0,05								

Abbildung B.15.: Signifikanztabelle, Attribut: Bass/Höhen-Balance, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen

B.3.2. Natürlichkeit

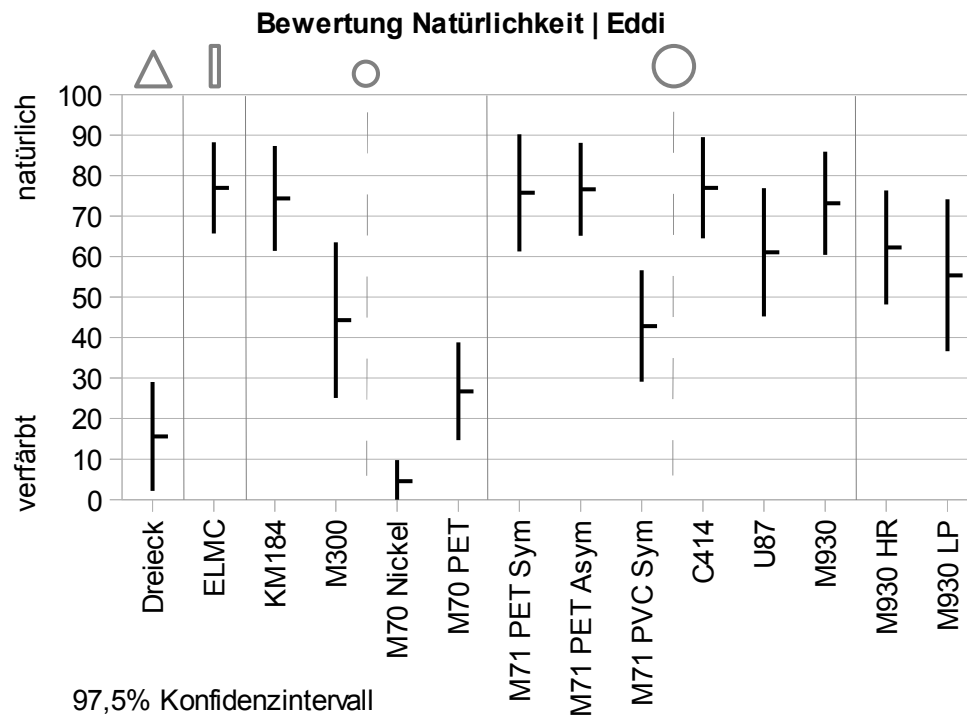


Abbildung B.16.: Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Eddi”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Natürlichkeit					Klangbeispiel: Eddi				
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,000	,105	1,000	1,000	,000	,000	,182	,000	,000	,000	,000	,001
ELMC ^a	,000		1,000	,020	,000	,000	1,000	1,000	,011	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,000	1,000		,061	,000	,000	1,000	1,000	,034	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,105	,020	,061		,001	1,000	,035	,024	1,000	,020	1,000	,098	1,000	1,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	,001		1,000	,000	,000	,002	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	,000	,000	1,000	1,000		,000	,000	1,000	,000	,010	,000	,006	,108
M71 PET Sym ^a	,000	1,000	1,000	,035	,000	,000		1,000	,019	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	,024	,000	,000	1,000		,013	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,182	,011	,034	1,000	,002	1,000	,019	,013		,011	1,000	,055	1,000	1,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	,020	,000	,000	1,000	1,000	,011		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,010	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	,098	,000	,000	1,000	1,000	,055	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,006	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	,001	1,000	1,000	1,000	,000	,108	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,025

Abbildung B.17.: Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Eddi”

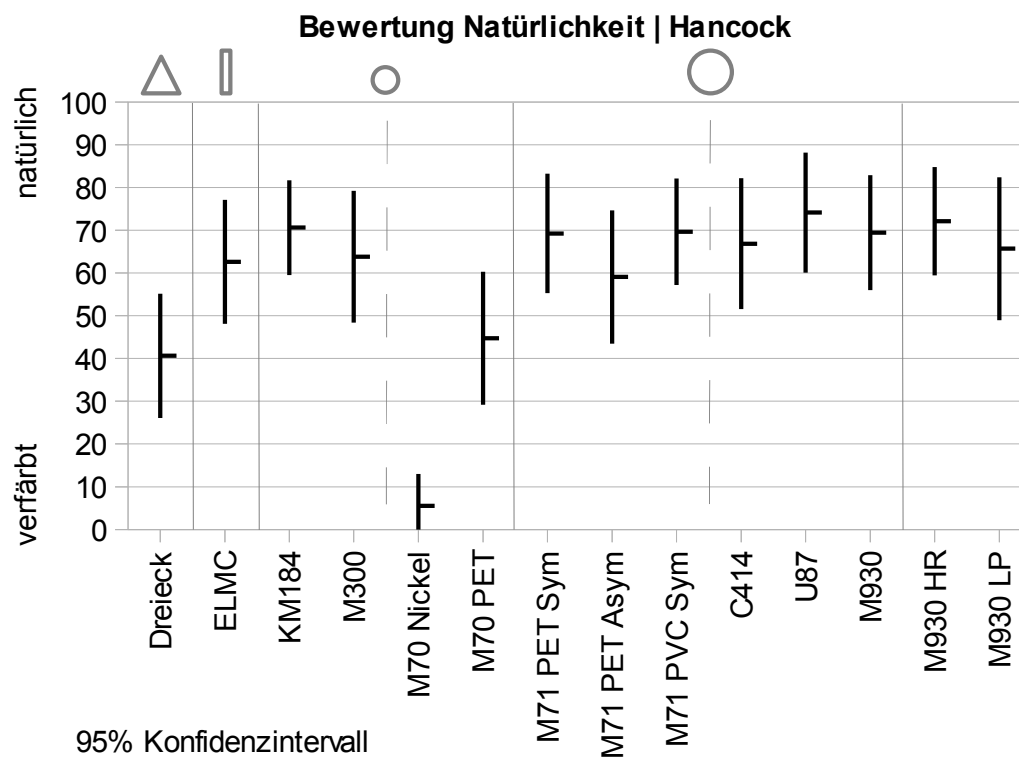


Abbildung B.18.: Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Hancock”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Natürlichkeit		Klangbeispiel: Hancock							
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		1,000	,295	1,000	,055	1,000	,449	1,000	,394	,895	,095	,425	,184	1,000
ELMC ^a	1,000		1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,295	1,000		1,000	,000	,994	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	1,000	1,000	1,000		,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M70 Nickel ^a	,055	,000	,000	,000		,012	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	1,000	,994	1,000	,012		1,000	1,000	1,000	1,000	,358	1,000	,649	1,000
M71 PET Sym ^a	,449	1,000	1,000	1,000	,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,394	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C414 ^a	,895	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,095	1,000	1,000	1,000	,000	,358	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,425	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,184	1,000	1,000	1,000	,000	,649	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.19.: Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Hancock”

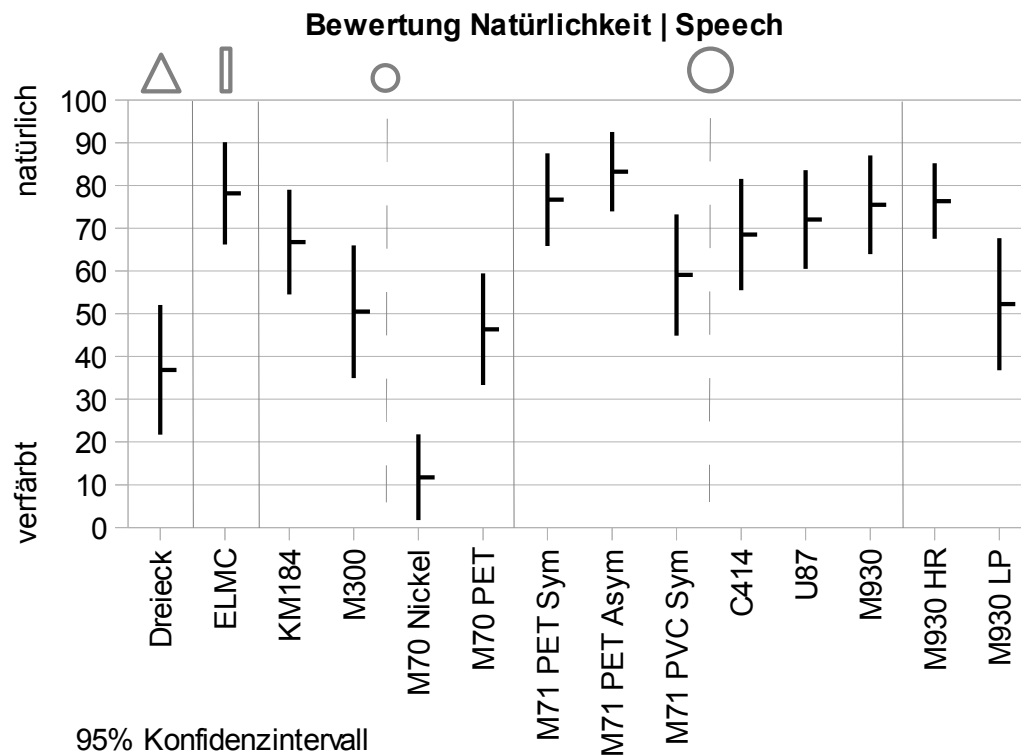


Abbildung B.20.: Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Speech”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Natürlichkeit				Klangbeispiel: Speech					
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,001	,101	1,000	,538	1,000	,002	,000	1,000	,052	,012	,003	,002	1,000
ELMC ^a	,001		1,000	,224	,000	,048	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,410
KM184 ^a	,101	1,000		1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	1,000	,224	1,000		,002	1,000	,377	,033	1,000	1,000	1,000	,560	,419	1,000
M70 Nickel ^a	,538	,000	,000	,002		,015	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,001
M70 PET ^a	1,000	,048	1,000	1,000	,015		,086	,006	1,000	1,000	,446	,133	,096	1,000
M71 PET Sym ^a	,002	1,000	1,000	,377	,000	,086		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,672
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	,033	,000	,006	1,000		,728	1,000	1,000	1,000	1,000	,066
M71 PVC Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	,728		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C414 ^a	,052	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,012	1,000	1,000	1,000	,000	,446	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,003	1,000	1,000	,560	,000	,133	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	,978
M930 HR ^a	,002	1,000	1,000	,419	,000	,096	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		,743
M930 LP ^a	1,000	,410	1,000	1,000	,001	1,000	,672	,066	1,000	1,000	1,000	,978	,743	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.21.: Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Speech”

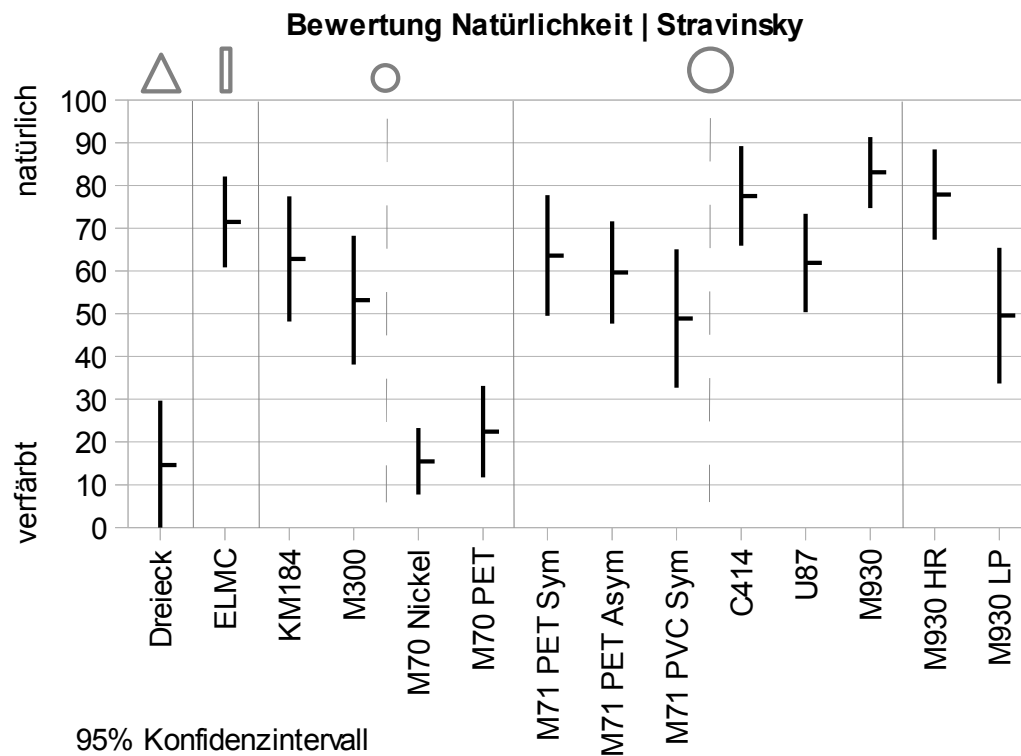


Abbildung B.22.: Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Stravinsky”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Natürlichkeit					Klangbeispiel: Stravinsky				
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,000	,003	1,000	1,000	,000	,000	,022	,000	,000	,000	,000	,016
ELMC ^a	,000		1,000	1,000	,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,000	1,000		1,000	,000	,002	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,003	1,000	1,000		,005	,086	1,000	1,000	1,000	,767	1,000	,118	,695	1,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	,005		1,000	,000	,000	,031	,000	,000	,000	,000	,024
M70 PET ^a	1,000	,000	,002	,086	1,000		,001	,006	,394	,000	,002	,000	,000	,312
M71 PET Sym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,001		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,006	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,022	1,000	1,000	1,000	,031	,394	1,000	1,000		,182	1,000	,022	,162	1,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	,767	,000	,000	1,000	1,000	,182		1,000	1,000	1,000	,231
U87 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,002	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	,118	,000	,000	1,000	1,000	,022	1,000	1,000		1,000	,030
M930 HR ^a	,000	1,000	1,000	,695	,000	,000	1,000	1,000	,162	1,000	1,000	1,000		,207
M930 LP ^a	,016	1,000	1,000	1,000	,024	,312	1,000	1,000	1,000	,231	1,000	,030	,207	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.23.: Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Klangbeispiel “Stravinsky”

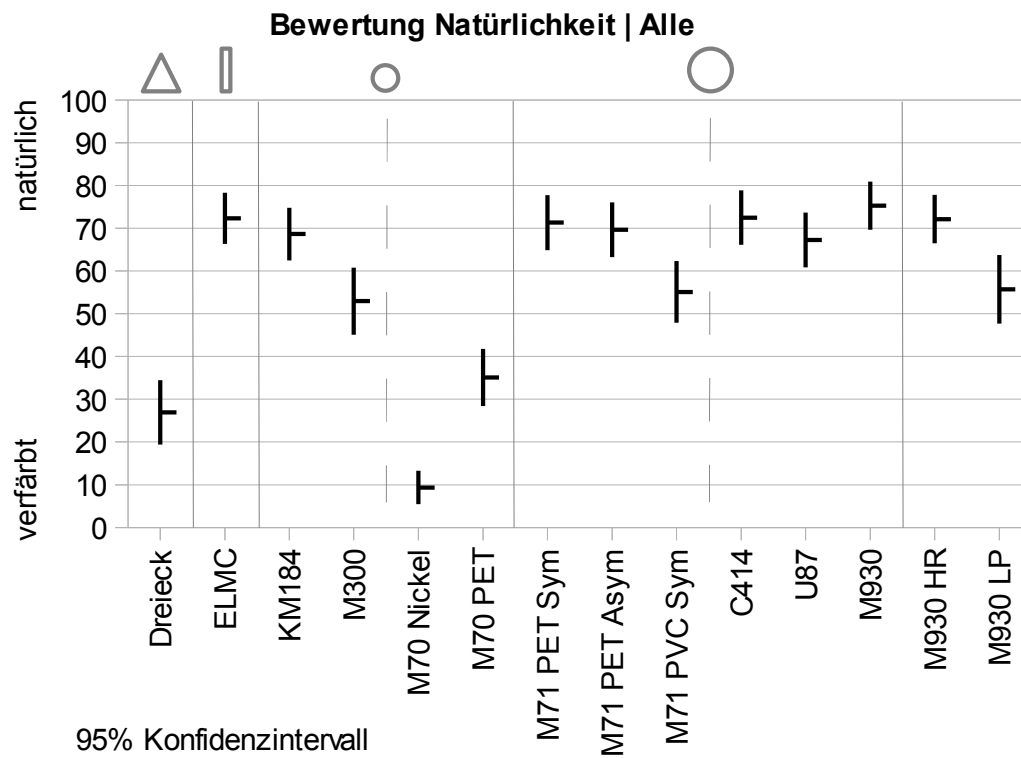


Abbildung B.24.: Bewertung, Attribut: Natürlichkeit, über alle Klangbeispiele

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Natürlichkeit			
Mikrofon Klangbeispiel								
	Eddi	Hancock	Speech	Stravinsky				
M71 PET Asym								
Eddi ^a		,280	1,000	,329				
Hancock ^a	,280		,042	1,000				
Speech ^a	1,000	,042		,051				
Stravinsky ^a	,329	1,000	,051					
Basiert auf den geschätzten Randmitteln								
a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni								
α-Niveau: 0,05								

Abbildung B.25.: Signifikanztabelle, Attribut: Natürlichkeit, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen

B.3.3. Nähe

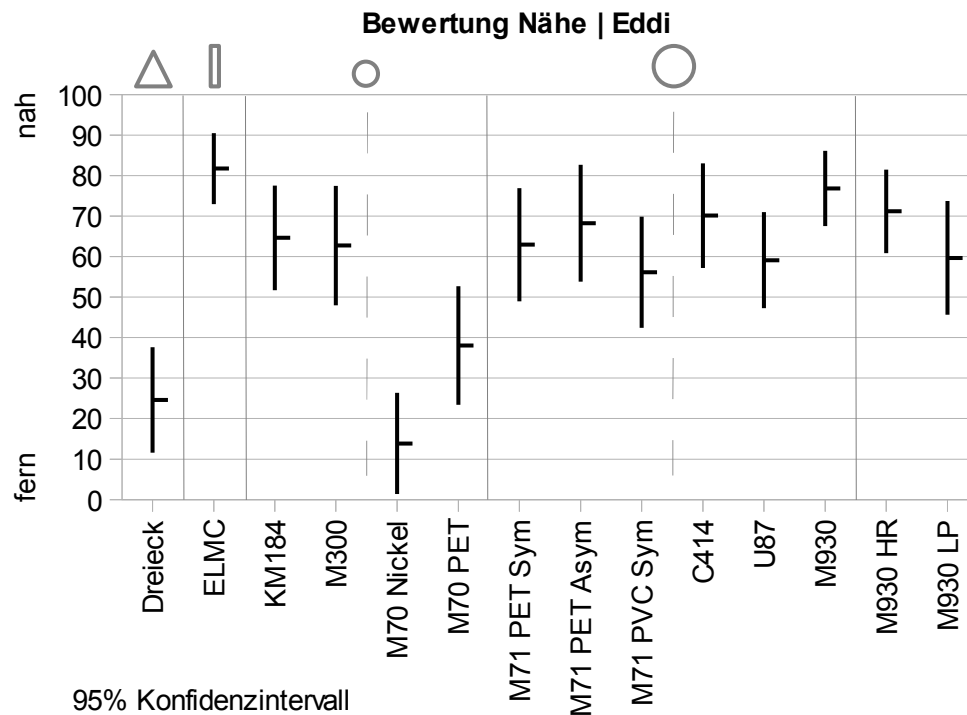


Abbildung B.26.: Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Eddi”

ANOVA	Paarweise Vergleiche			Attribut: Nähe				Klangbeispiel: Eddi						
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,002	,005	1,000	1,000	,004	,000	,070	,000	,022	,000	,000	,017
ELMC ^a	,000		1,000	1,000	,000	,000	1,000	1,000	,543	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,002	1,000		1,000	,000	,400	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,005	1,000	1,000		,000	,731	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	,000		,854	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	,000	,400	,731	,854		,689	,113	1,000	,056	1,000	,004	,037	1,000
M71 PET Sym ^a	,004	1,000	1,000	1,000	,000	,689		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,113	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,070	,543	1,000	1,000	,001	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,056	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,022	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,004	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,037	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	,017	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.27.: Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Eddi”

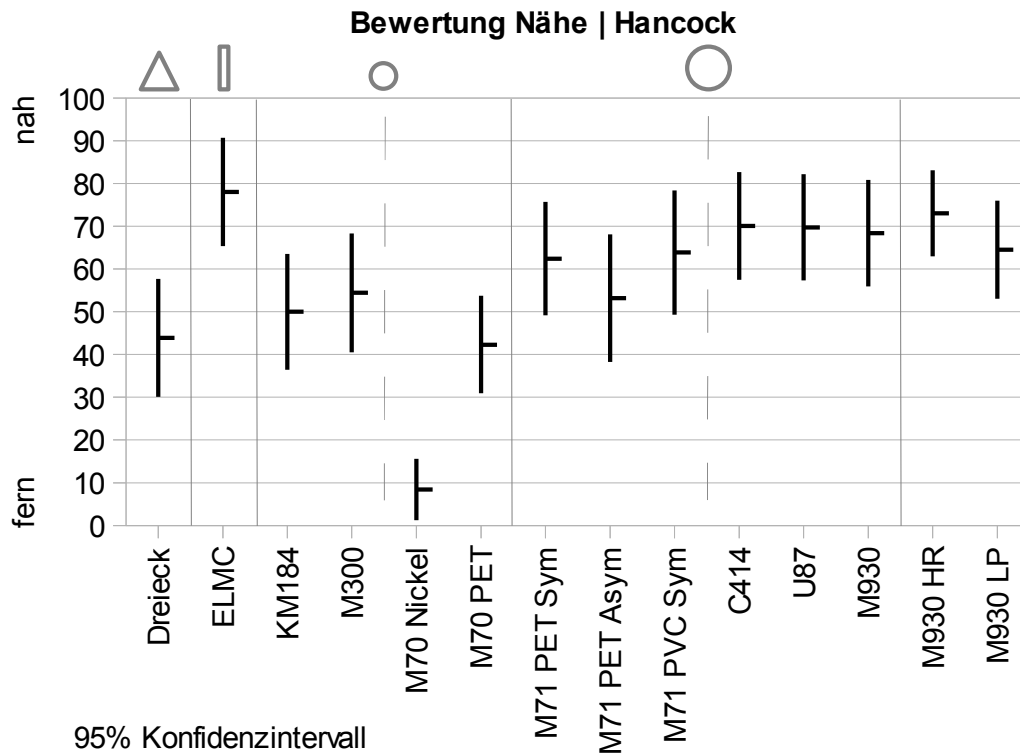


Abbildung B.28.: Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Hancock”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Nähe										Klangbeispiel: Hancock			
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP				
Dreieck ^a		,020	1,000	1,000	,012	1,000	1,000	1,000	1,000	,397	,440	,689	,139	1,000				
ELMC ^a	,020		,208	,908	,000	,010	1,000	,611	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
KM184 ^a	1,000	,208		1,000	,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M300 ^a	1,000	,908	1,000		,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M70 Nickel ^a	,012	,000	,001	,000		,023	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000				
M70 PET ^a	1,000	,010	1,000	1,000	,023		1,000	1,000	1,000	,232	,259	,414	,077	1,000				
M71 PET Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PET ASym ^a	1,000	,611	1,000	1,000	,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PVC Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
C414 ^a	,397	1,000	1,000	1,000	,000	,232	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000				
U87 ^a	,440	1,000	1,000	1,000	,000	,259	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000				
M930 ^a	,689	1,000	1,000	1,000	,000	,414	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000				
M930 HR ^a	,139	1,000	1,000	1,000	,000	,077	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000				
M930 LP ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000					

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.29.: Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Hancock”

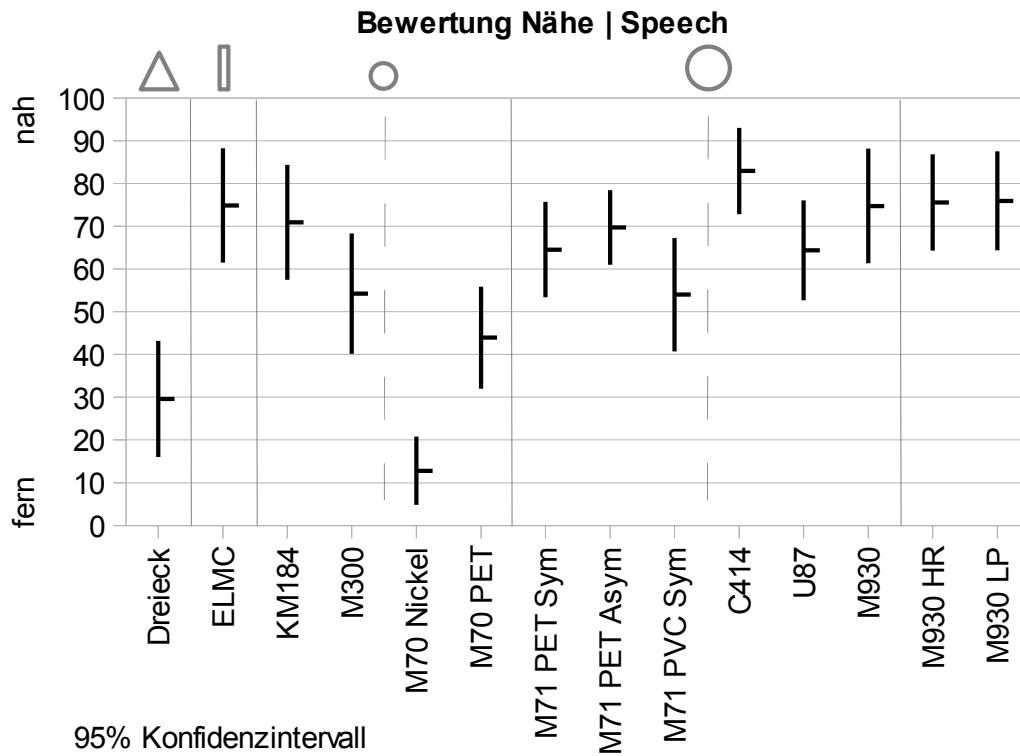


Abbildung B.30.: Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Speech”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Nähe									
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,000	,435	1,000	1,000	,007	,001	,474	,000	,007	,000	,000	,000
ELMC ^a	,000		1,000	1,000	,000	,038	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
KM184 ^a	,000	1,000		1,000	,000	,183	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,435	1,000	1,000		,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,096	1,000	1,000	1,000	1,000
M70 Nickel ^a	1,000	,000	,000	,000		,035	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
M70 PET ^a	1,000	,038	,183	1,000	,035		1,000	,284	1,000	,001	1,000	,040	,029	,024
M71 PET Sym ^a	,007	1,000	1,000	1,000	,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	,001	1,000	1,000	1,000	,000	,284	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,474	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000		,087	1,000	1,000	1,000	1,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	,096	,000	,001	1,000	1,000	,087		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,007	1,000	1,000	1,000	,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,040	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,029	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,000	,024	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

α-Niveau: 0,05

Abbildung B.31.: Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Speech”

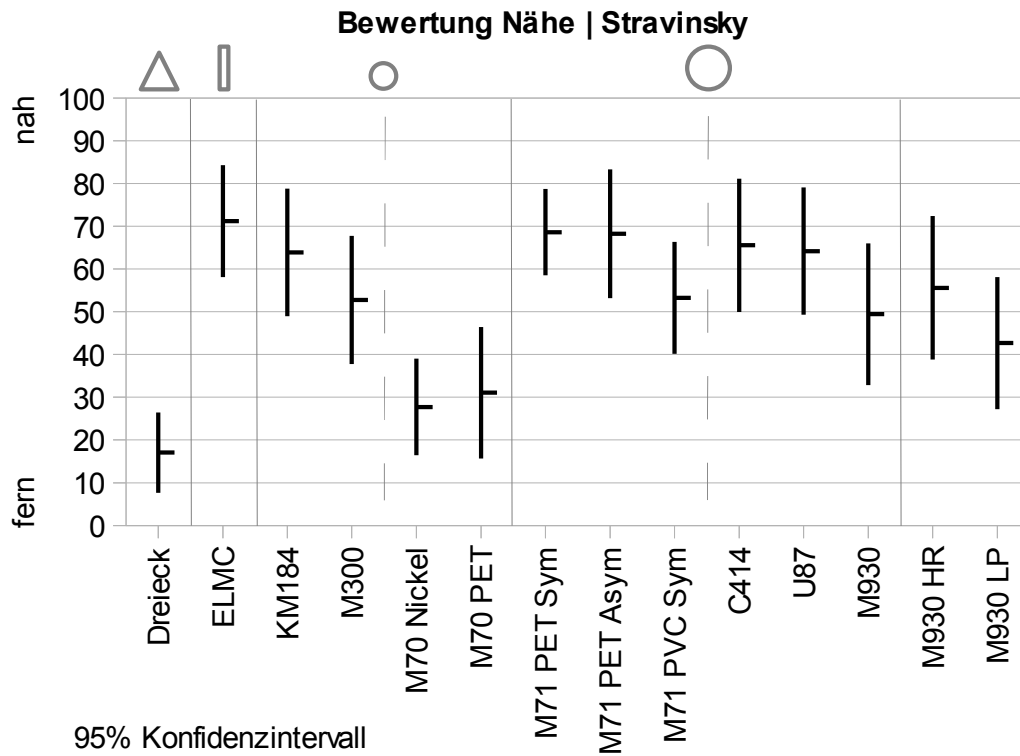


Abbildung B.32.: Bewertung, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Stravinsky”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Nähe		Klangbeispiel: Stravinsky							
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,000	,001	,056	1,000	1,000	,000	,000	,047	,000	,001	,168	,020	1,000
ELMC ^a	,000		1,000	1,000	,003	,011	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,545
KM184 ^a	,001	1,000		1,000	,048	,146	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M300 ^a	,056	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M70 Nickel ^a	1,000	,003	,048	1,000		1,000	,009	,010	1,000	,027	,043	1,000	,652	1,000
M70 PET ^a	1,000	,011	,146	1,000	1,000		,029	,033	1,000	,084	,132	1,000	1,000	1,000
M71 PET Sym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,009	,029		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PET ASym ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,010	,033	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M71 PVC Sym ^a	,047	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C414 ^a	,000	1,000	1,000	1,000	,027	,084	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000
U87 ^a	,001	1,000	1,000	1,000	,043	,132	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000
M930 ^a	,168	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000
M930 HR ^a	,020	1,000	1,000	1,000	,652	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
M930 LP ^a	1,000	,545	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.33.: Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Klangbeispiel “Stravinsky”

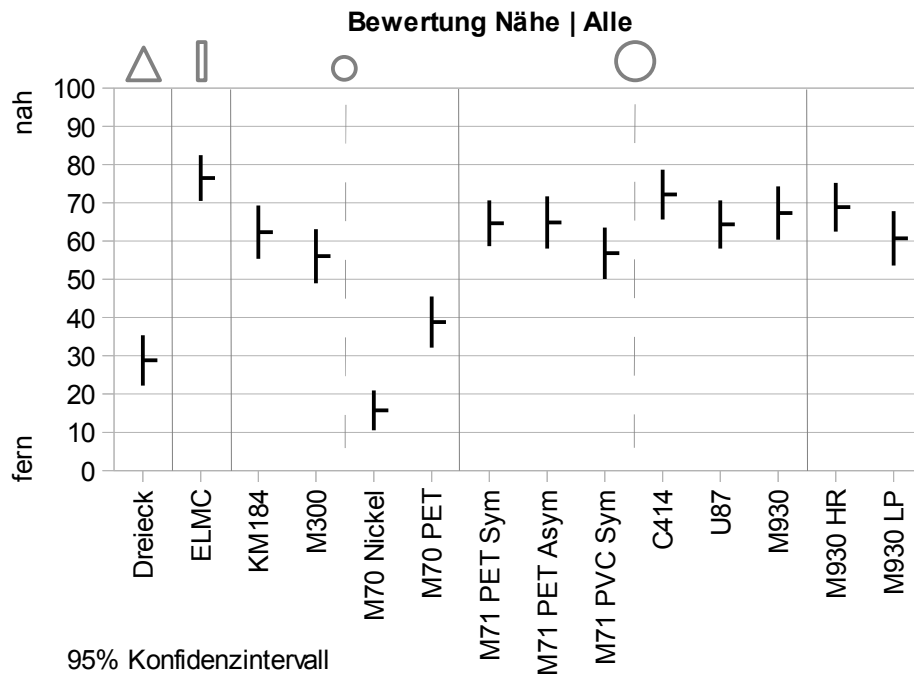


Abbildung B.34.: Bewertung, Attribut: Nähe, über alle Klangbeispiele

ANOVA	Paarweise Vergleiche		Attribut: Nähe	
Mikrofon Klangbeispiel	Eddi	Hancock	Speech	Stravinsky
Dreieck				
Eddi ^a		,227	1,000	1,000
Hancock ^a	,227		,728	,027
Speech ^a	1,000	,728		1,000
Stravinsky ^a	1,000	,027	1,000	
M930				
Eddi ^a		1,000	1,000	,033
Hancock ^a	1,000		1,000	,307
Speech ^a	1,000	1,000		,060
Stravinsky ^a	,033	,307	,060	
Basiert auf den geschätzten Randmitteln				
a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni				
α-Niveau: 0,05				

Abbildung B.35.: Signifikanztabelle, Attribut: Nähe, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen

B.3.4. Transparenz

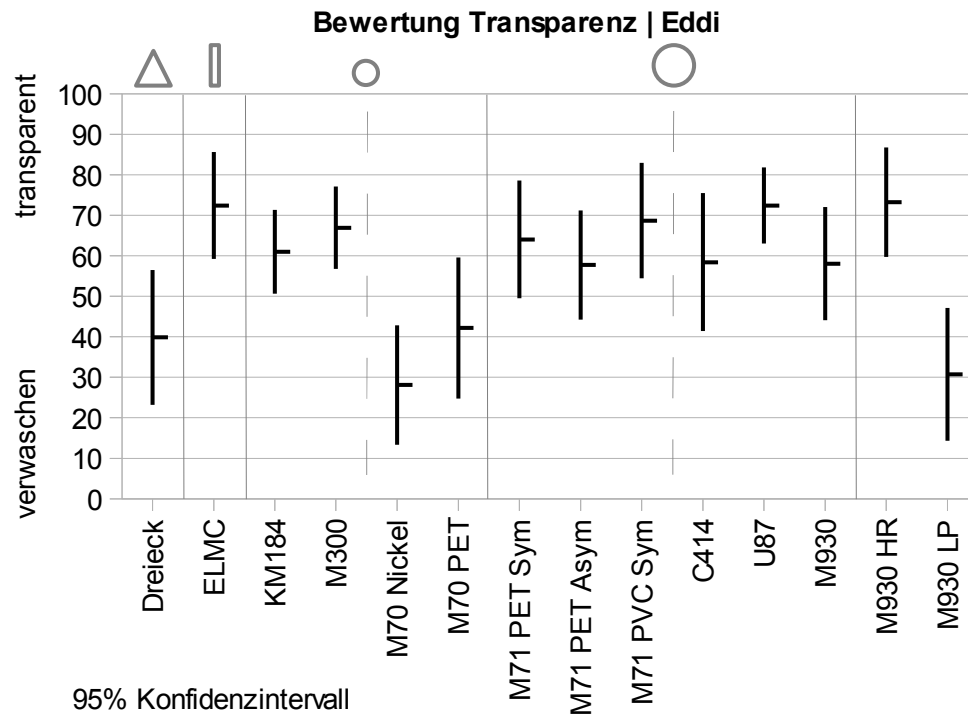


Abbildung B.36.: Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Eddi”

ANOVA	Paarweise Vergleiche													
	Attribut: Transparenz													
	Klangbeispiel: Eddi													
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP
Dreieck ^a		,150	1,000	,786	1,000	1,000	1,000	1,000	,476	1,000	,150	1,000	,115	1,000
ELMC ^a	,150		1,000	1,000	,002	,309	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,006
KM184 ^a	1,000	1,000		1,000	,135	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,309
M300 ^a	,786	1,000	1,000		,017	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,044
M70 Nickel ^a	1,000	,002	,135	,017		1,000	,048	,374	,009	,303	,002	,340	,001	1,000
M70 PET ^a	1,000	,309	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	,920	1,000	,309	1,000	,241	1,000
M71 PET Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,048	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,117
M71 PET ASym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,374	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,800
M71 PVC Sym ^a	,476	1,000	1,000	1,000	,009	,920	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	,024
C414 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,303	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	,659
U87 ^a	,150	1,000	1,000	1,000	,002	,309	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	,006
M930 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,340	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	,733
M930 HR ^a	,115	1,000	1,000	1,000	,001	,241	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		,004
M930 LP ^a	1,000	,006	,309	,044	1,000	1,000	,117	,800	,024	,659	,006	,733	,004	

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

α-Niveau: 0,05

Abbildung B.37.: Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Eddi”

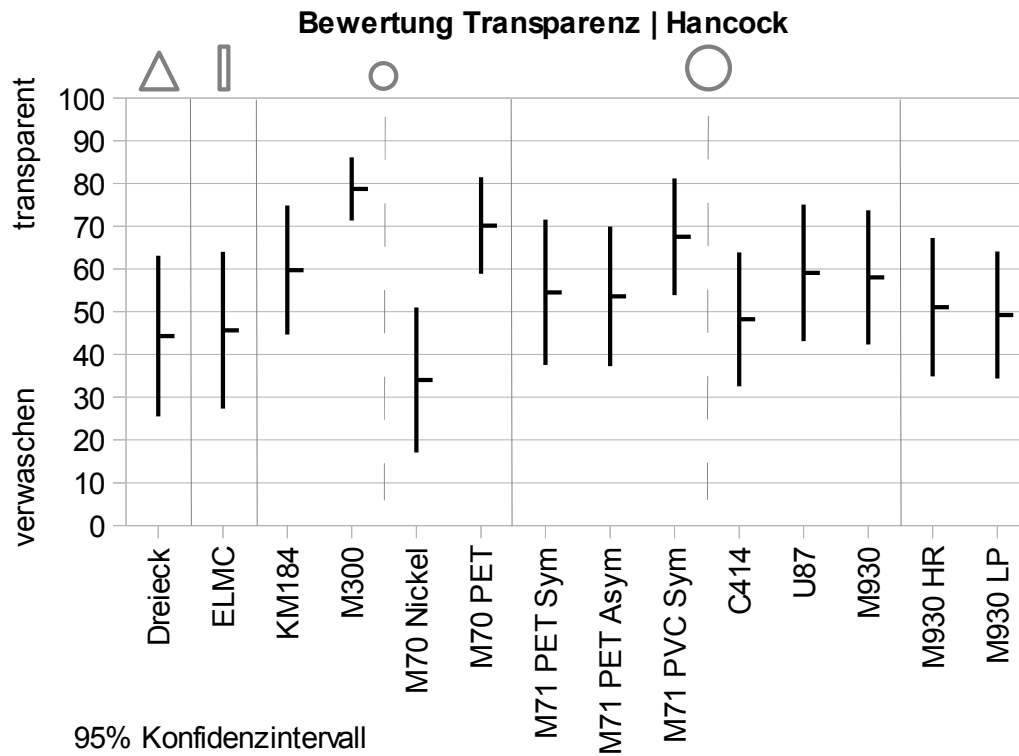


Abbildung B.38.: Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Hancock”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Transparenz										Klangbeispiel: Hancock			
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP				
Dreieck ^a		1,000	1,000	,213	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
ELMC ^a	1,000		1,000	,314	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
KM184 ^a	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M300 ^a	,213	,314	1,000		,008	1,000	1,000	1,000	1,000	,627	1,000	1,000	1,000	,812				
M70 Nickel ^a	1,000	1,000	1,000	,008		,130	1,000	1,000	,278	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M70 PET ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,130		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PET Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PET ASym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PVC Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,278	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
C414 ^a	1,000	1,000	1,000	,627	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000				
U87 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000				
M930 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000				
M930 HR ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000				
M930 LP ^a	1,000	1,000	1,000	,812	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000					

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.39.: Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Hancock”

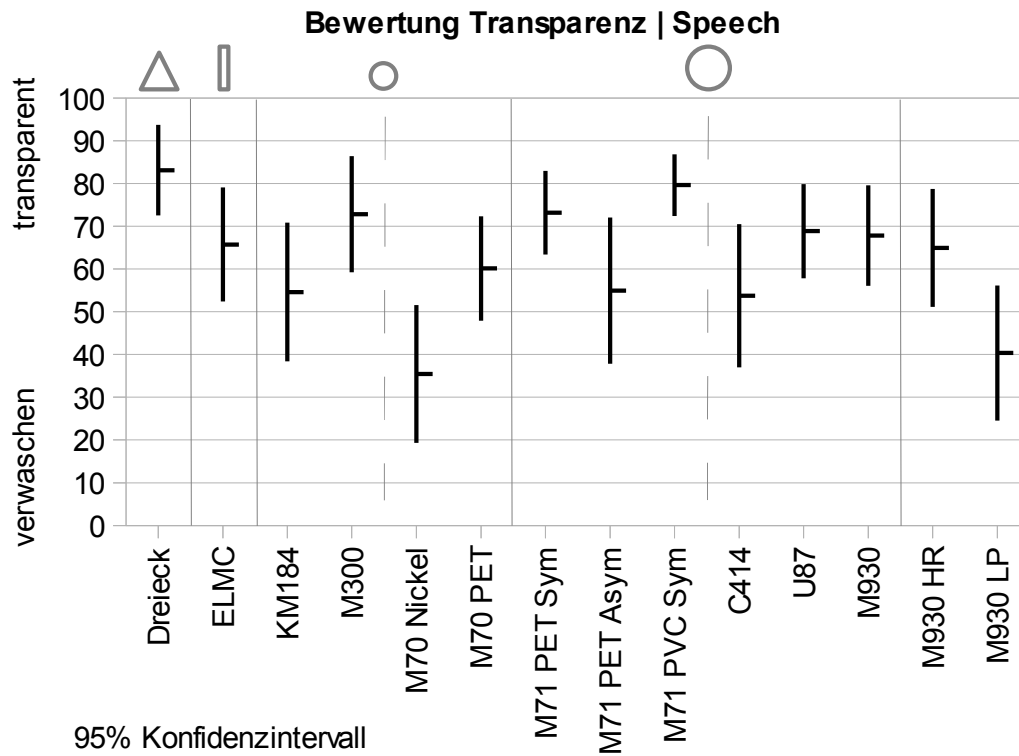


Abbildung B.40.: Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Speech”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Transparenz										Klangbeispiel: Speech			
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP				
Dreieck ^a		1,000	,356	1,000	,000	1,000	1,000	,393	1,000	,270	1,000	1,000	1,000	1,000	,002			
ELMC ^a	1,000		1,000	1,000	,199	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,916			
KM184 ^a	,356	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000			
M300 ^a	1,000	1,000	1,000		,016	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,097			
M70 Nickel ^a	,000	,199	1,000	,016		1,000	,014	1,000	,001	1,000	,068	,099	,259	1,000				
M70 PET ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PET Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,014	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,085			
M71 PET ASym ^a	,393	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000			
M71 PVC Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,001	1,000	1,000	1,000		,792	1,000	1,000	1,000	1,000	,007			
C414 ^a	,270	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,792		1,000	1,000	1,000	1,000				
U87 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,068	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	,356				
M930 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,099	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	,496				
M930 HR ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,259	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000				
M930 LP ^a	,002	,916	1,000	,097	1,000	1,000	,085	1,000	,007	1,000	,356	,496	1,000					

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni

α-Niveau: 0,05

Abbildung B.41.: Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Speech”

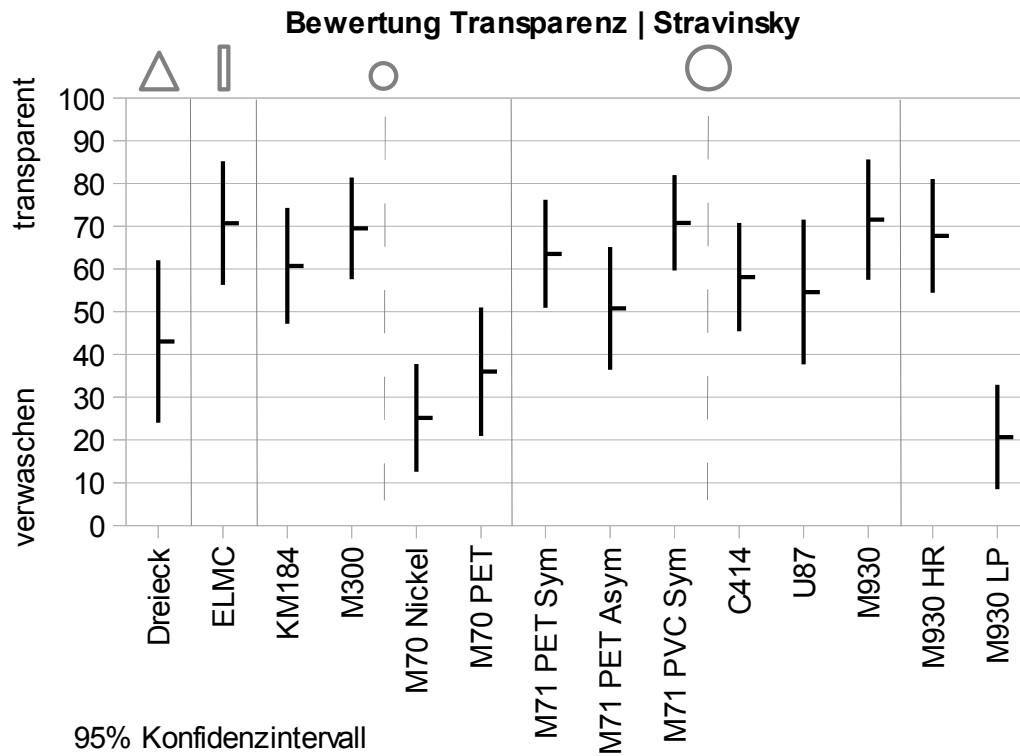


Abbildung B.42.: Bewertung, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Stravinsky”

ANOVA	Paarweise Vergleiche				Attribut: Transparenz										Klangbeispiel: Stravinsky			
Mikrofon	Dreieck	ELMC	KM184	M300	M70 Nickel	M70 PET	M71 PET Sym	M71 PET ASym	M71 PVC Sym	C414	U87	M930	M930 HR	M930 LP				
Dreieck ^a		1,000	,356	1,000	,000	1,000	1,000	,393	1,000	,270	1,000	1,000	1,000	,002				
ELMC ^a	1,000		1,000	1,000	,199	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,916				
KM184 ^a	,356	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M300 ^a	1,000	1,000	1,000		,016	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,097				
M70 Nickel ^a	,000	,199	1,000	,016		1,000	,014	1,000	,001	1,000	,068	,099	,259	1,000				
M70 PET ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PET Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,014	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,085				
M71 PET ASym ^a	,393	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
M71 PVC Sym ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,001	1,000	1,000	1,000		,792	1,000	1,000	1,000	,007				
C414 ^a	,270	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,792		1,000	1,000	1,000	1,000				
U87 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,068	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	,356				
M930 ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,099	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	,496				
M930 HR ^a	1,000	1,000	1,000	1,000	,259	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000				
M930 LP ^a	,002	,916	1,000	,097	1,000	1,000	,085	1,000	,007	1,000	,356	,496	1,000					

Basiert auf den geschätzten Randmitteln a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni α-Niveau: 0,05

Abbildung B.43.: Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Klangbeispiel “Stravinsky”

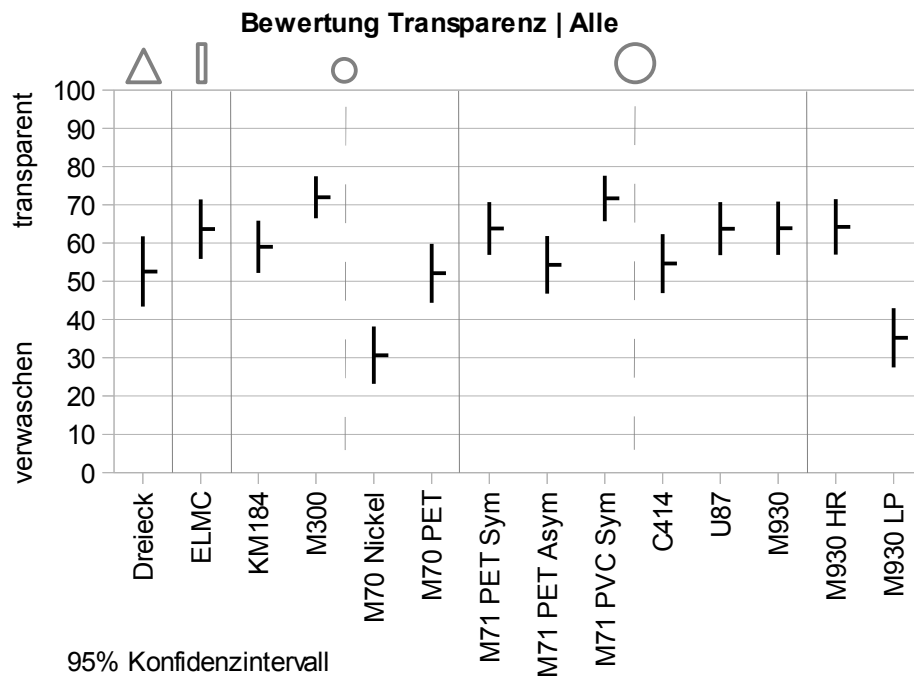


Abbildung B.44.: Bewertung, Attribut: Transparenz, über alle Klangbeispiele

ANOVA	Paarweise Vergleiche		Attribut: Transparenz	
Mikrofon Klangbeispiel	Eddi	Hancock	Speech	Stravinsky
Dreieck				
Eddi ^a		1,000	,004	1,000
Hancock ^a	1,000		,012	1,000
Speech ^a	,004	,012		,009
Stravinsky ^a	1,000	1,000	,009	
M70 PET				
Eddi ^a		,049	,510	1,000
Hancock ^a	,049		1,000	,009
Speech ^a	,510	1,000		,131
Stravinsky ^a	1,000	,009	,131	
Basiert auf den geschätzten Randmitteln				
a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni				
α-Niveau: 0,05				

Abbildung B.45.: Signifikanztabelle, Attribut: Transparenz, Unterscheidung zwischen verschiedenen Mikrofonen

B.3.5. Allgemeines Ranking

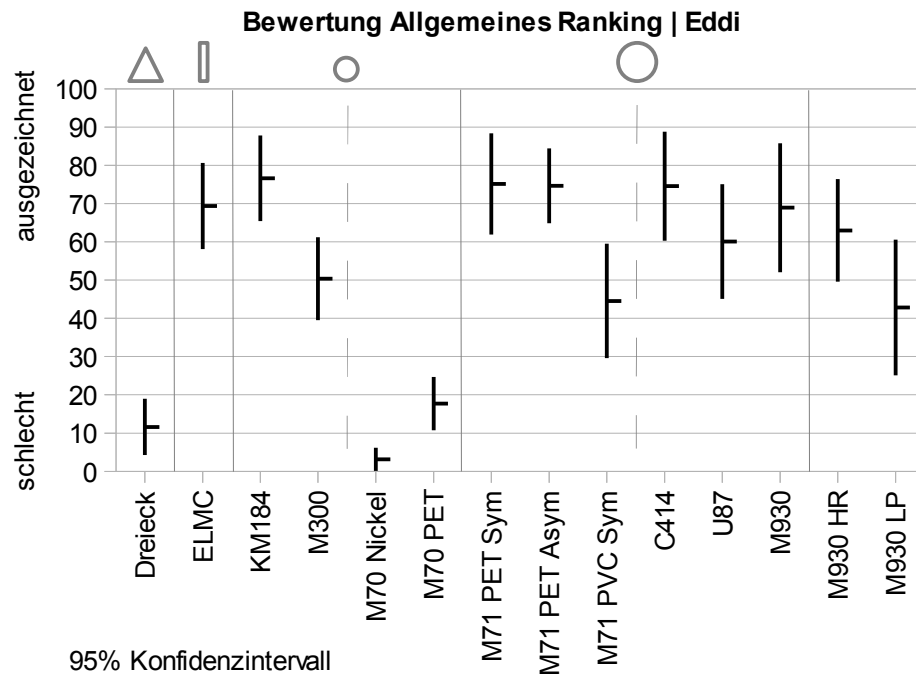


Abbildung B.46.: Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel “Eddi”

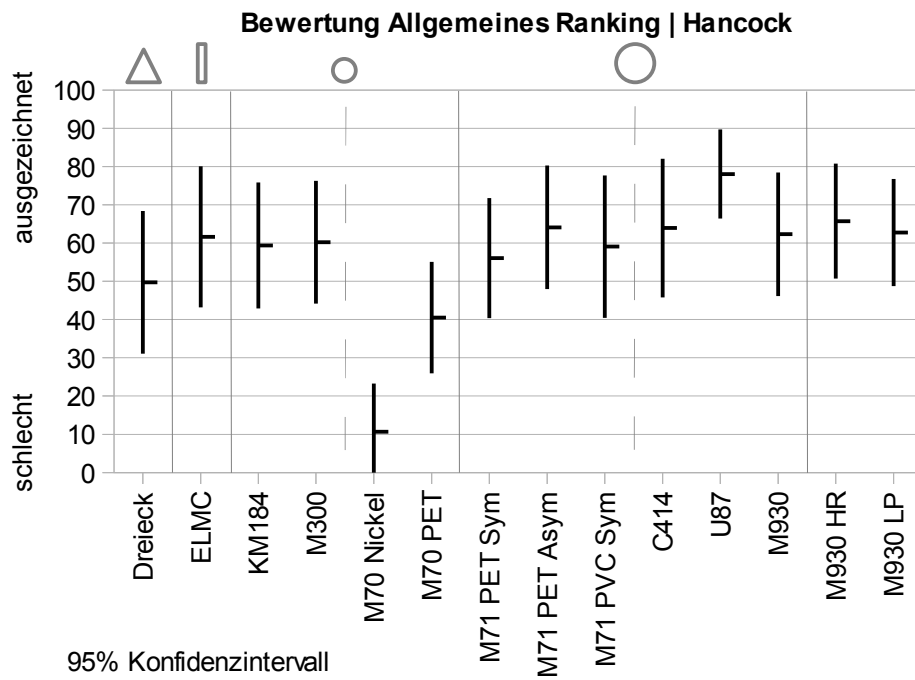


Abbildung B.47.: Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel “Hancock”

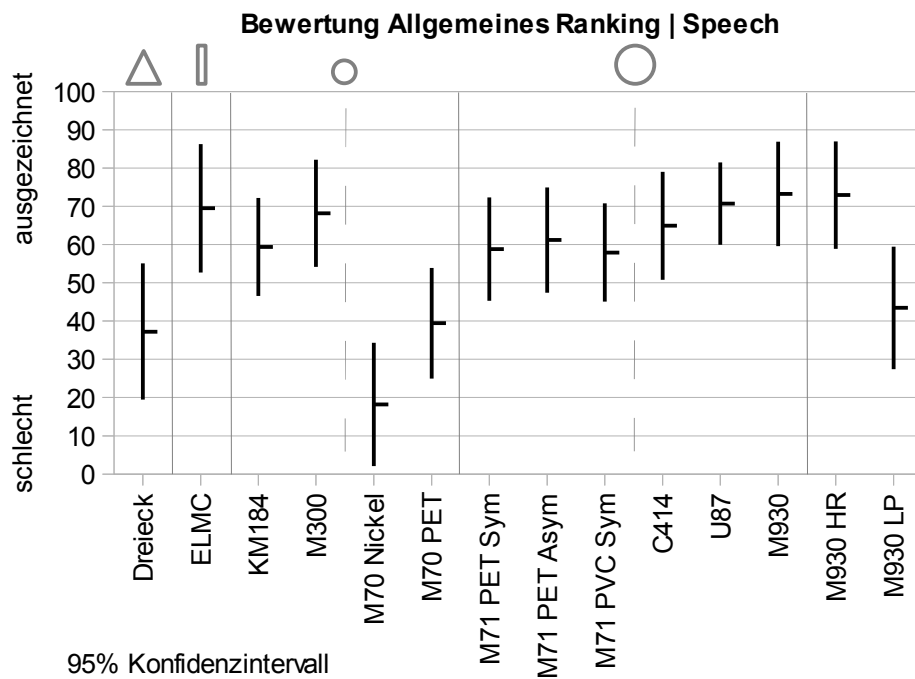


Abbildung B.48.: Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel “Speech”

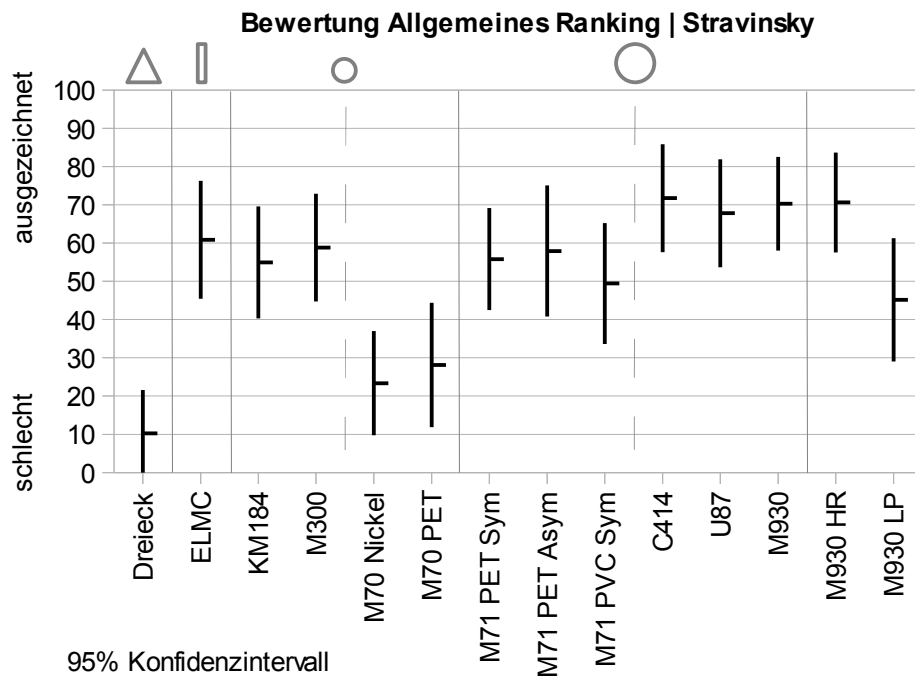


Abbildung B.49.: Bewertung allgemeines Ranking, Klangbeispiel “Stravinsky”

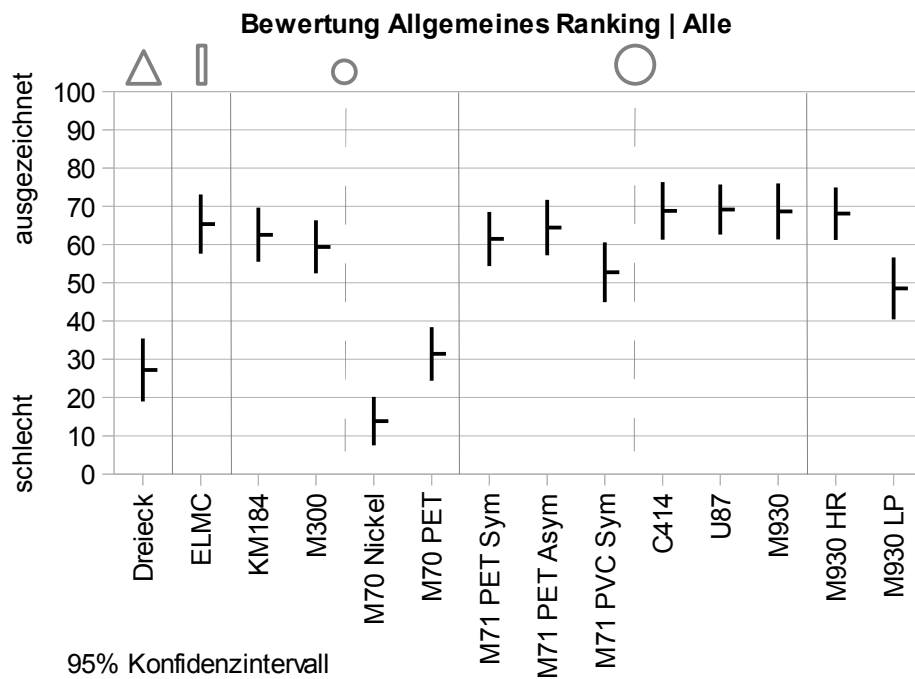


Abbildung B.50.: Bewertung allgemeines Ranking, über alle Klangbeispiele

C. Darstellung von Membranschwingungen (Auszug)

C.1. Punktuelle Messung von Rechteckimpulsen

C.1.1. Druckempfänger, Übertragungsfunktionen bei 2 V Burst

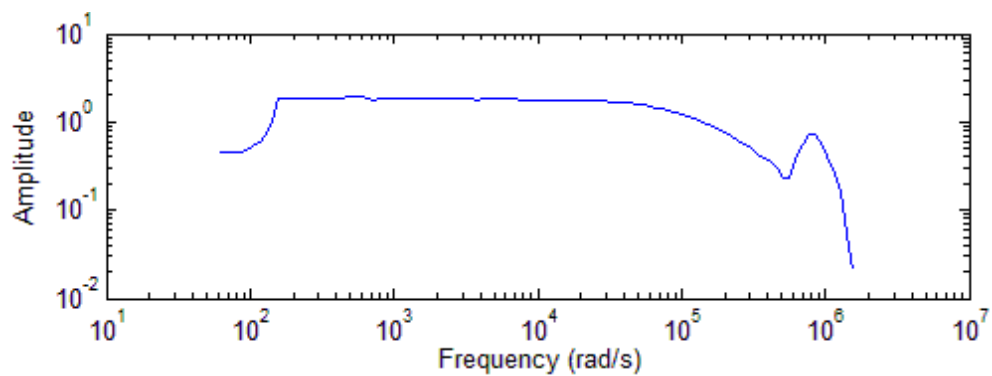


Abbildung C.1.: MK301, Referenz, Polarisationsspannung 200 V

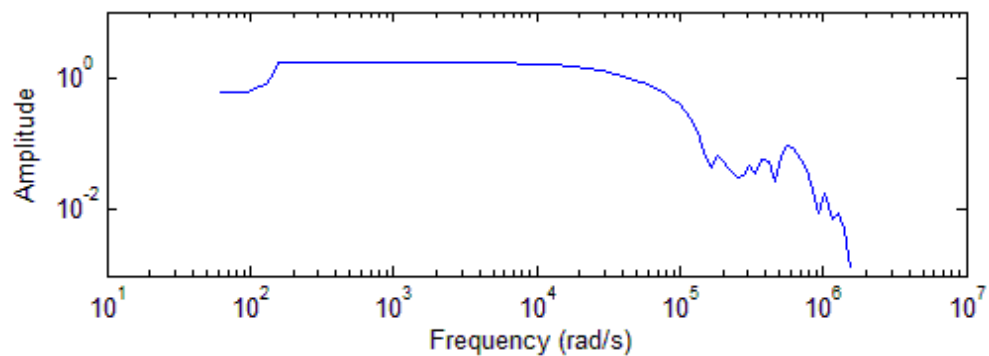


Abbildung C.2.: MK221, Referenz, Polarisationsspannung 200 V

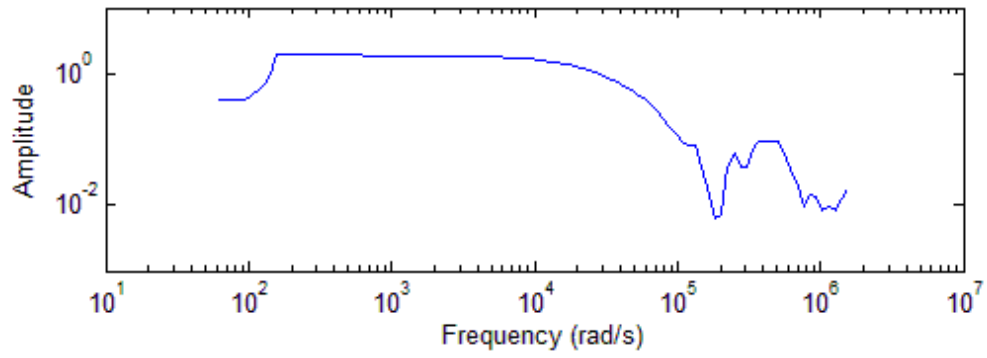


Abbildung C.3.: MK102, Referenz, Polarisationsspannung 200V

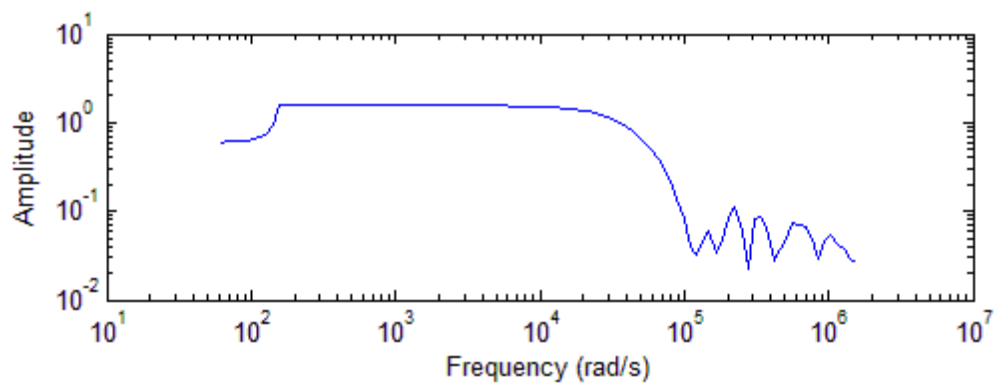


Abbildung C.4.: MK102, Referenz, Polarisationsspannung 80 V

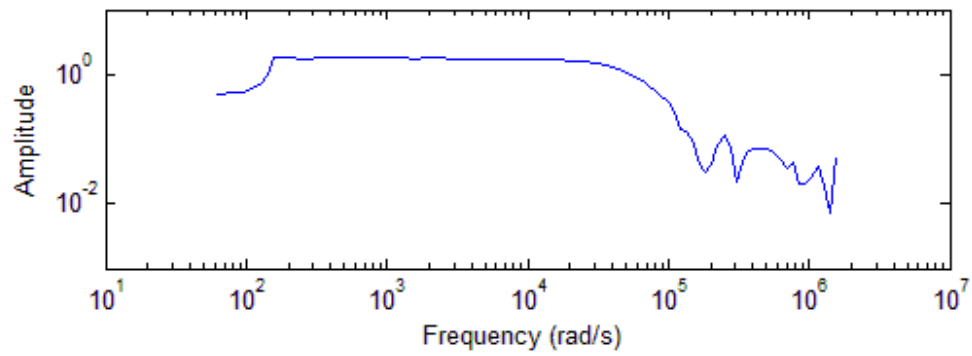


Abbildung C.5.: M296, Polarisationsspannung 80 V

C.1.2. Gradientenempfänger, Übertragungsfunktionen bei 2 V Burst

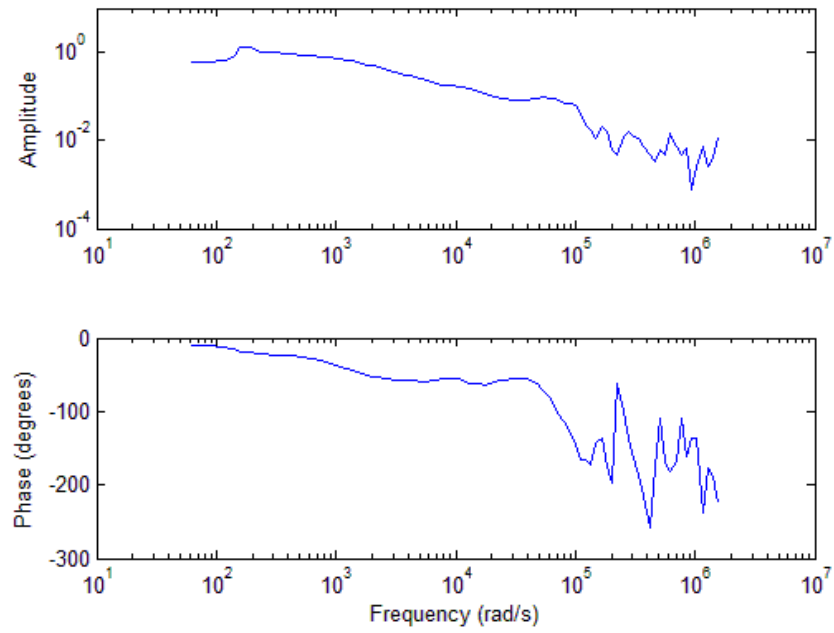


Abbildung C.6.: M7 sym, #7401, + 2 V Burst-Anregung

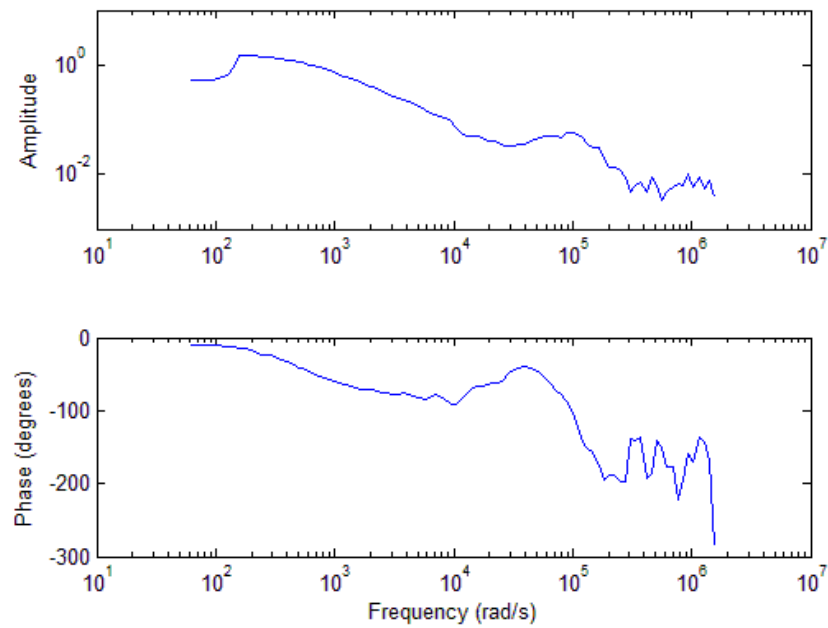


Abbildung C.7.: M7 asym, #7802, + 2 V Burst-Anregung

C.2. Flächenscan mit Sinus-Anregungssignal (reziprok)

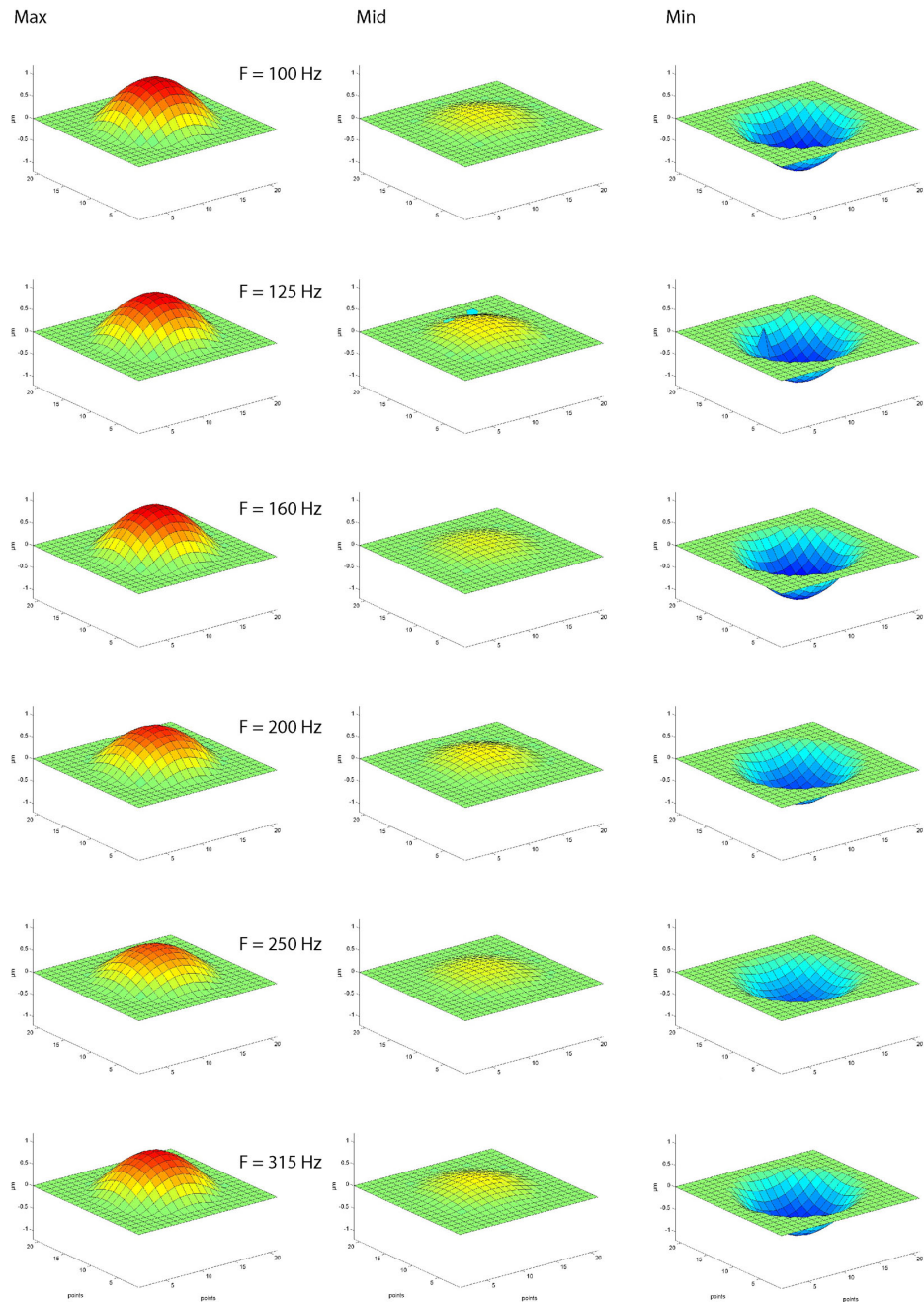


Abbildung C.8.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 100 Hz - 315 Hz

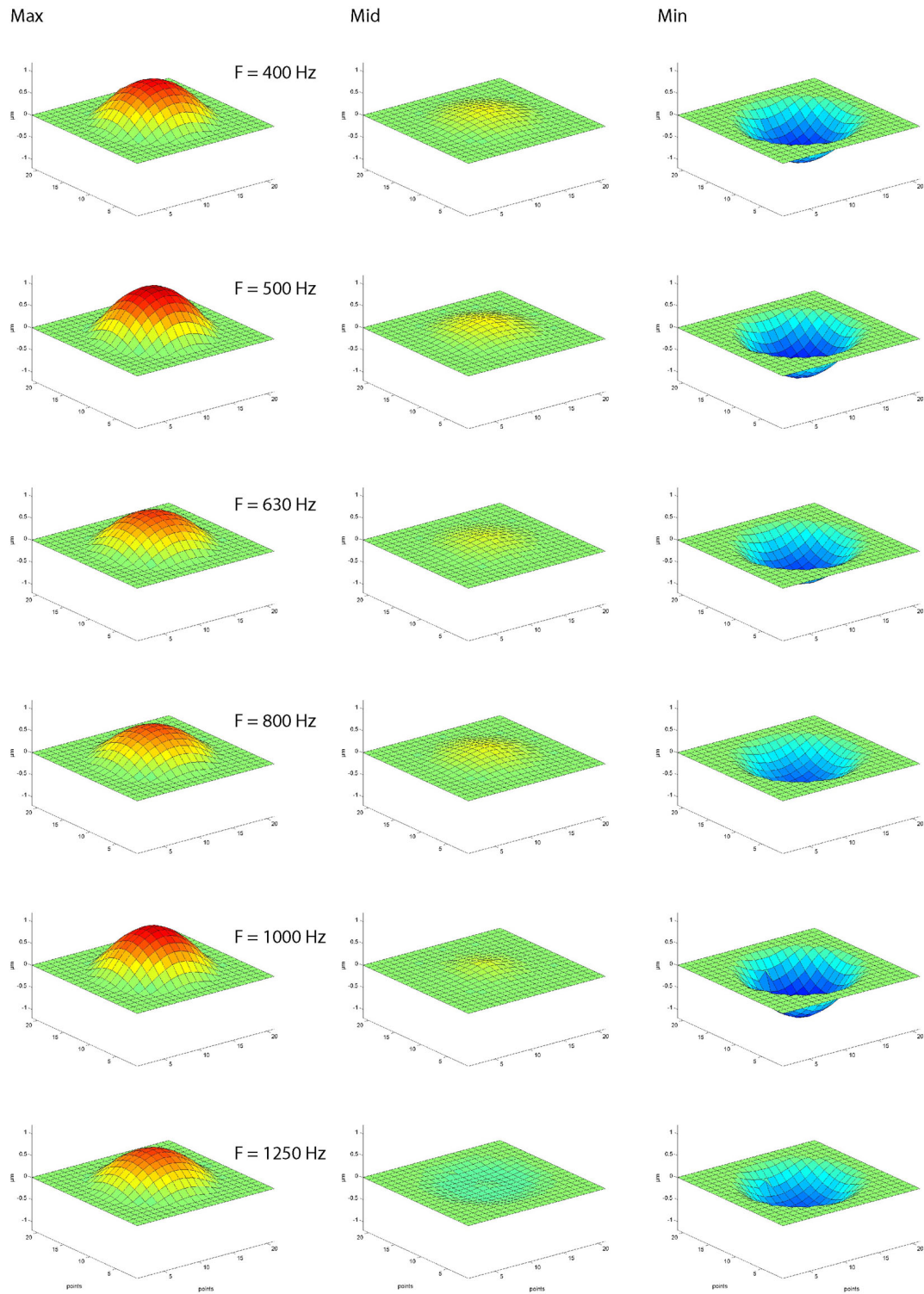


Abbildung C.9.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 400 Hz - 1250 Hz

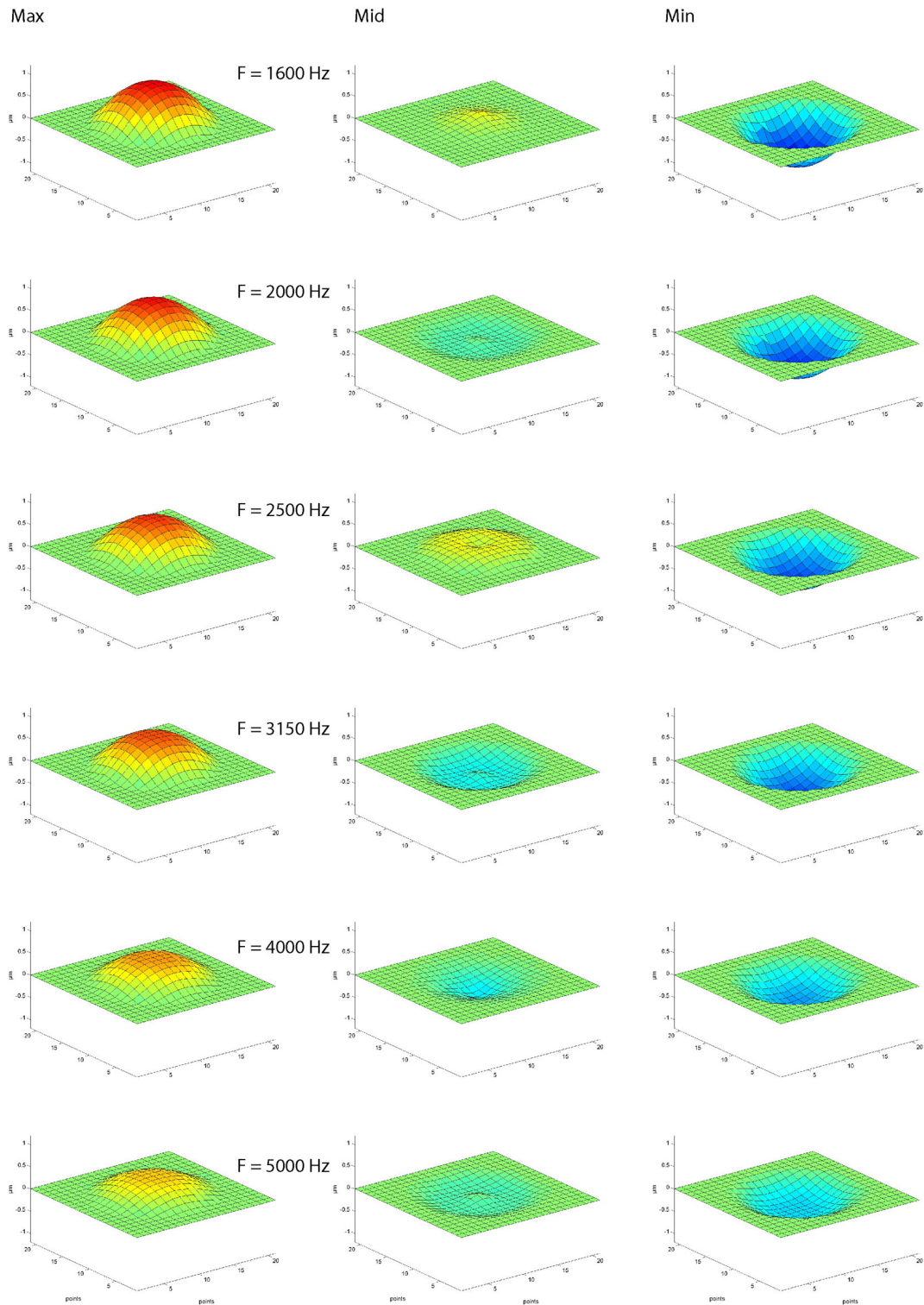


Abbildung C.10.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 1600 Hz - 5000 Hz

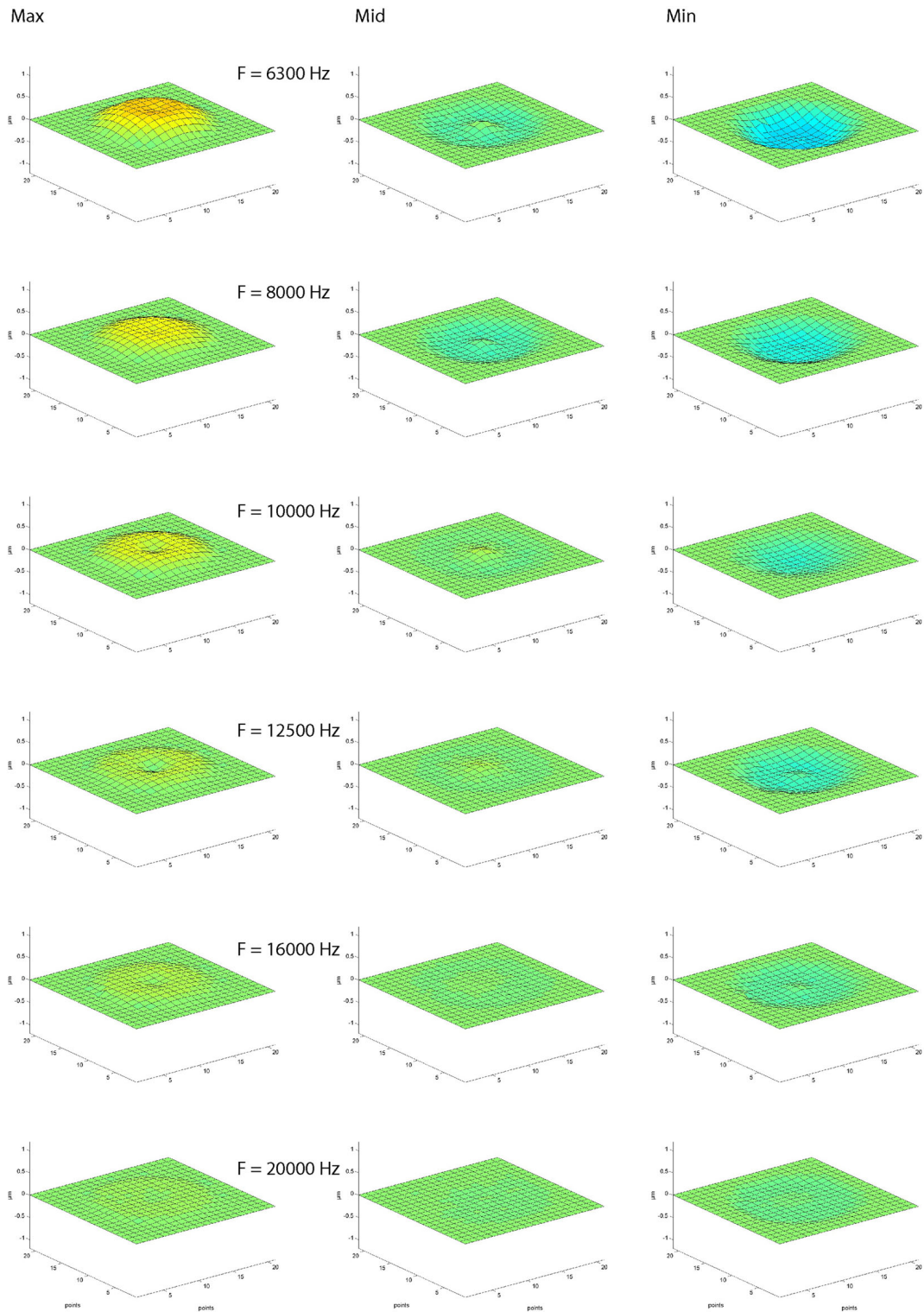


Abbildung C.11.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 6300 Hz - 20000 Hz

Verlauf der Membranschwingung MK 102 bei 4 V Sin, 22500 Hz, 200 V Speisespannung

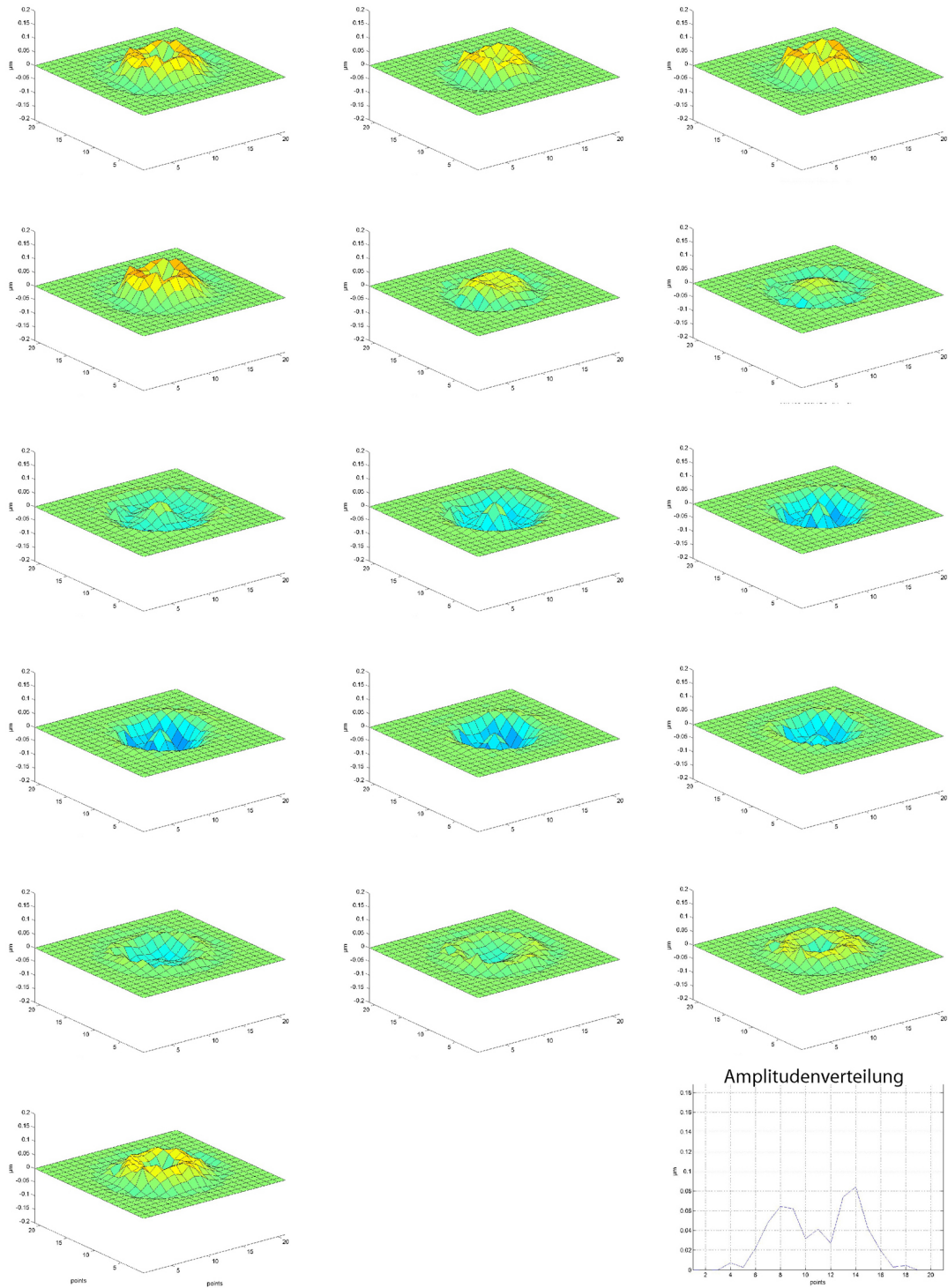


Abbildung C.12.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 22500 Hz

Verlauf der Membranschwingung MK 102 bei 4 V Sin, 25000 Hz, 200 V Speisespannung

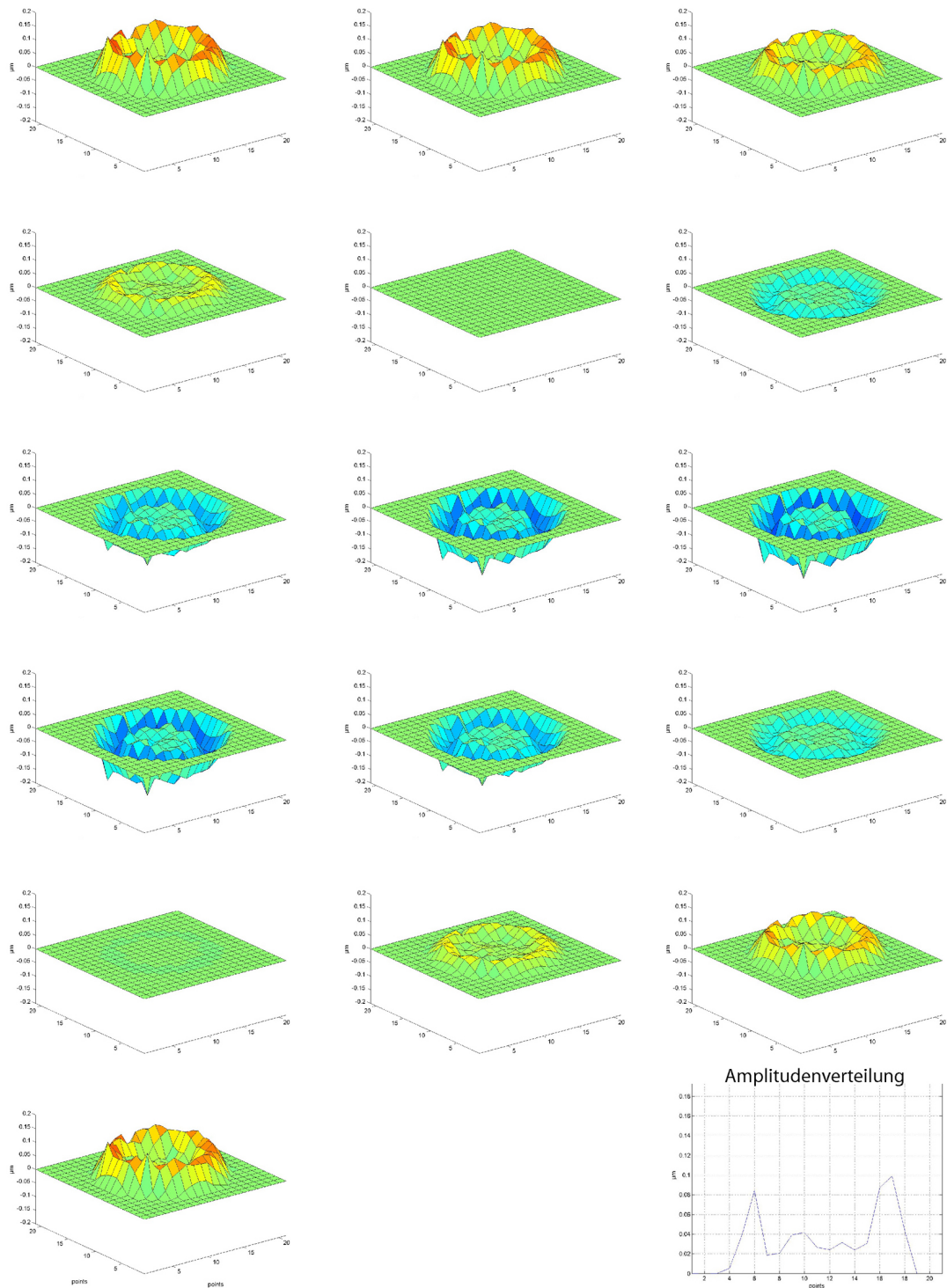


Abbildung C.13.: Flächenschwingung MK102 bei 4 V Sin, 25000 Hz

D. Prototypen/Messergebnisse/Auswertungen (Auszug)

D.1. Hochvolt-Verstärker (Neuentwicklung)

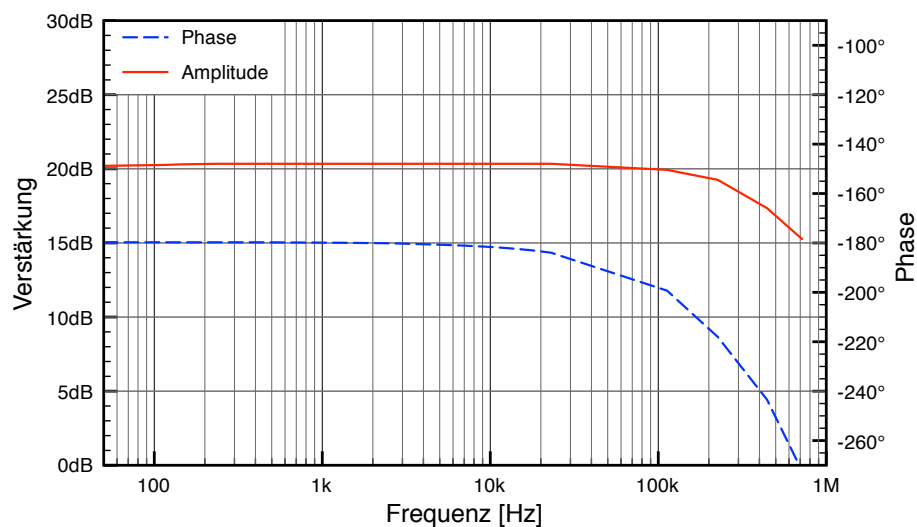


Abbildung D.1.: Bode-Diagramm des neu entwickelten Hochvolt-Verstärkers (Dipl.-Ing. Thaden Cohrs)

Parameter	Minimum	Maximum	Einheit
NF Eingangsspannung	0	9	V _{SS}
NF Ausgangsspannung	0	90	V _{SS}
Gleichspannungsoffset	0	400	V _{DC}
untere 3dB-Grenzfrequenz	<5		Hz
obere 3dB-Grenzfrequenz	480		kHz
Klirrfaktor 10V@1kHz	0,0047		%

Abbildung D.2.: elektrische Daten des Hochvolt-Verstärkers

D.2. MK221 mit Variationen in Membranmaterial und -dicke (Prototypen)

D.2.1. Amplituden - Frequenzgänge

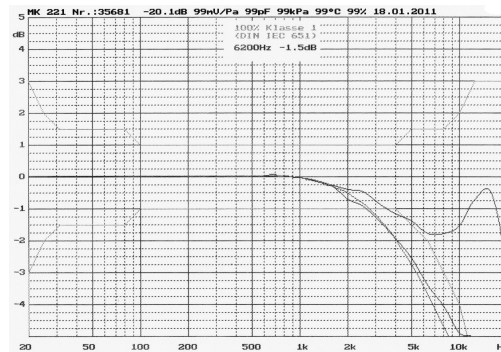


Abbildung D.3.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: schwach

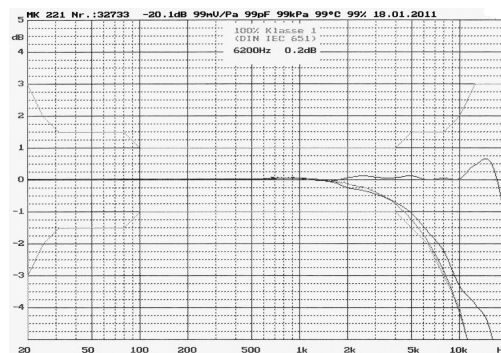


Abbildung D.4.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: mittel

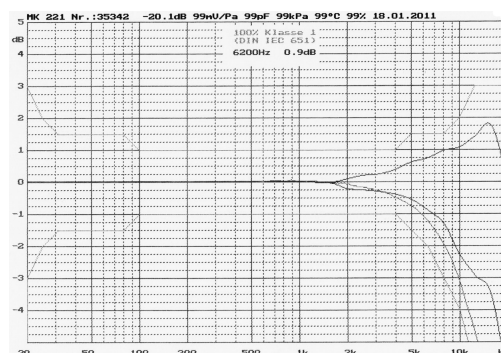


Abbildung D.5.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: stark

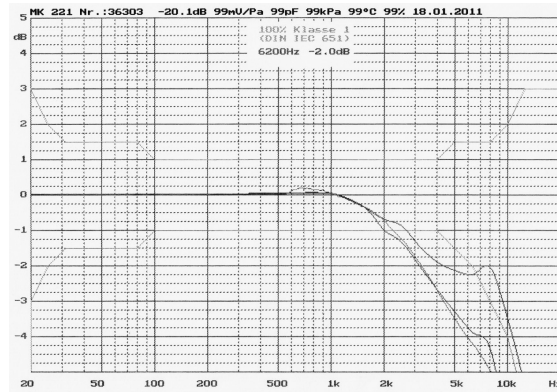


Abbildung D.6.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: schwach

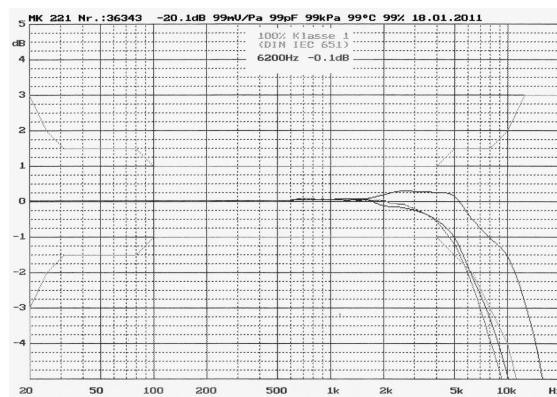


Abbildung D.7.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: mittel

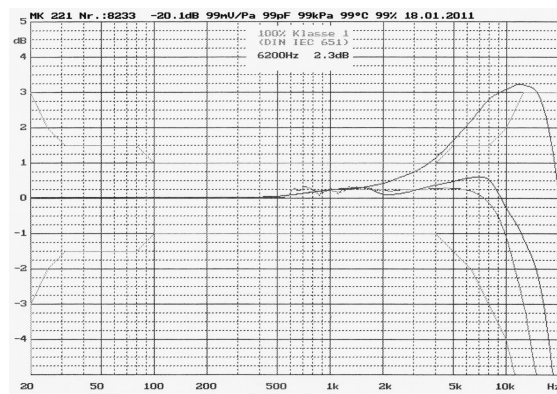


Abbildung D.8.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: stark

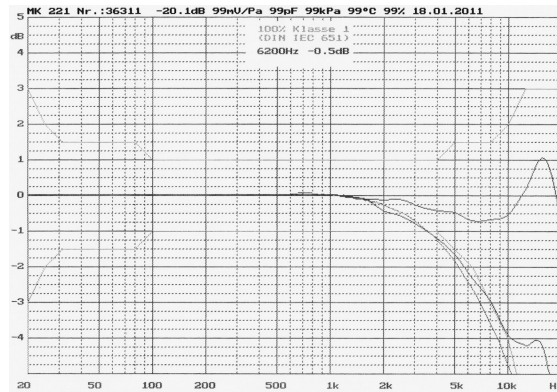


Abbildung D.9.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: schwach

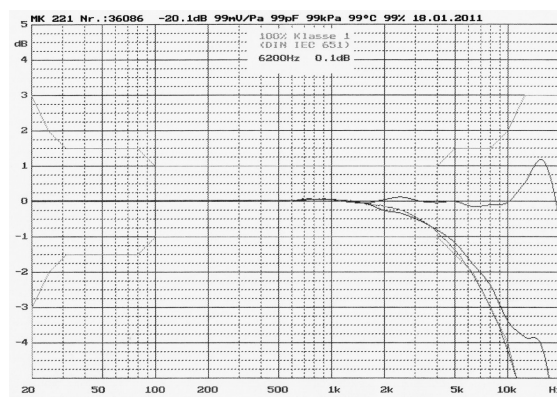


Abbildung D.10.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: mittel

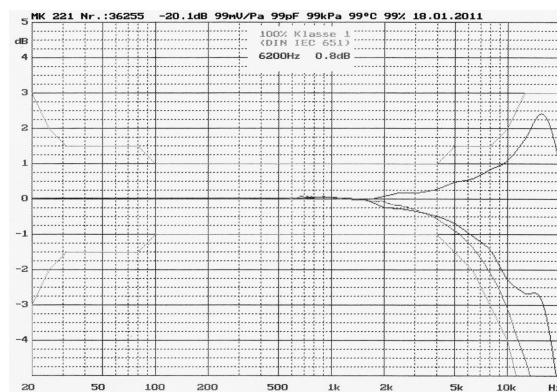


Abbildung D.11.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: stark

D.2.2. Übertragungsfunktionen (optische Abtastung, Chirp-Anregung)

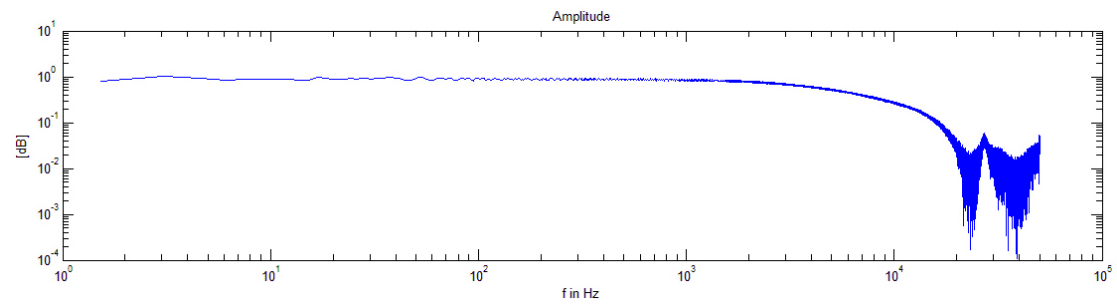


Abbildung D.12.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: schwach

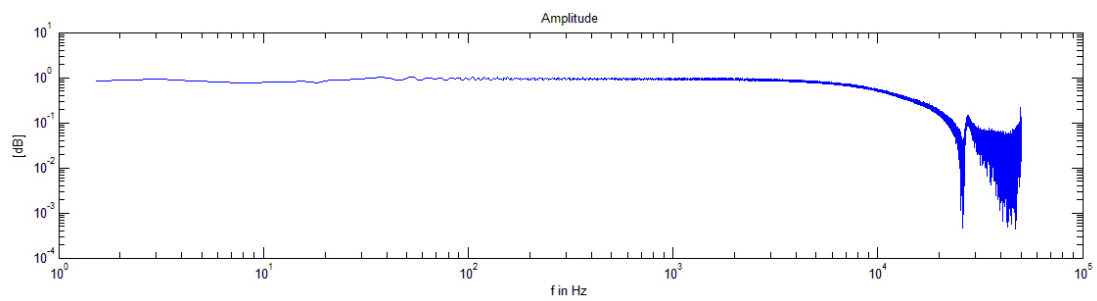


Abbildung D.13.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: mittel

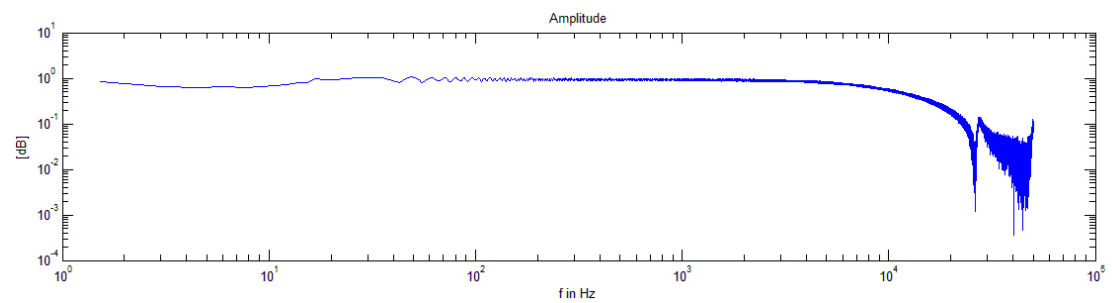


Abbildung D.14.: Material: Nickel, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: stark

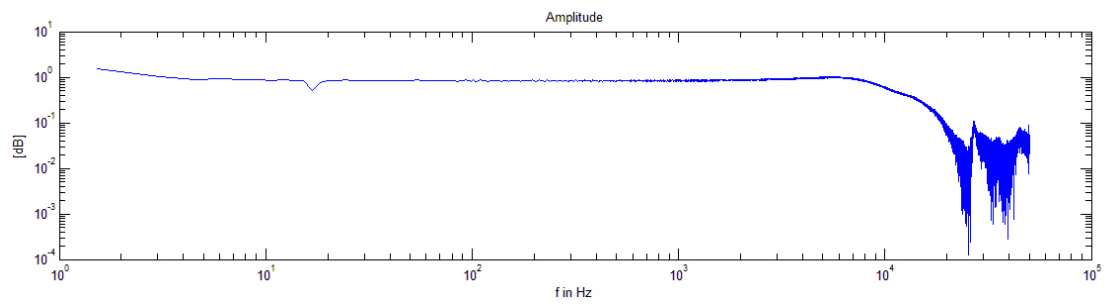


Abbildung D.15.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: schwach

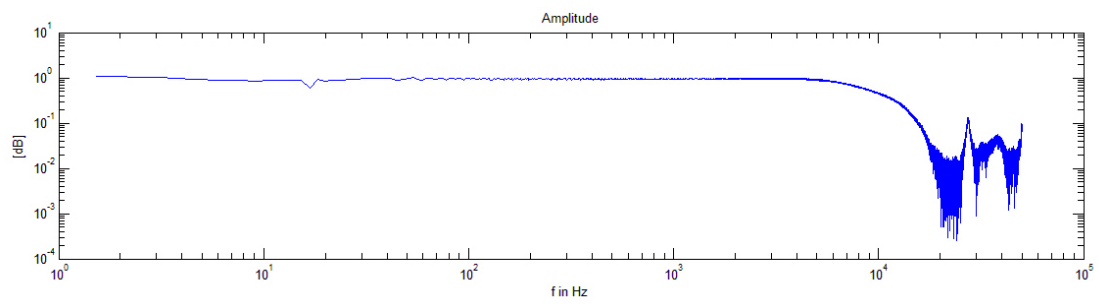


Abbildung D.16.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: mittel

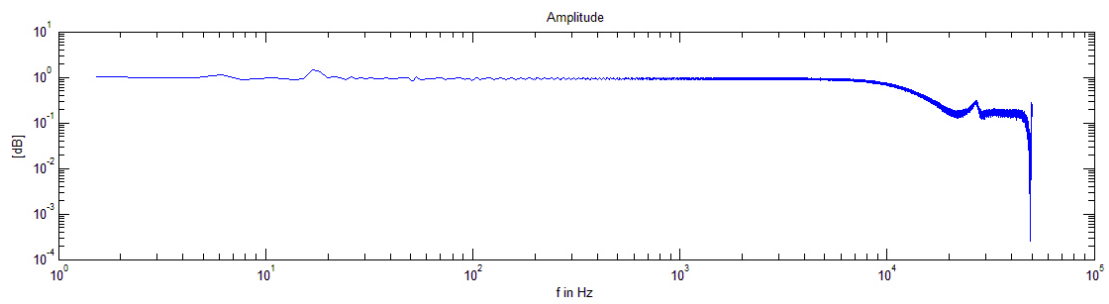


Abbildung D.17.: Material: Nickel, Dicke 4 μm , mechanische Spannung: stark

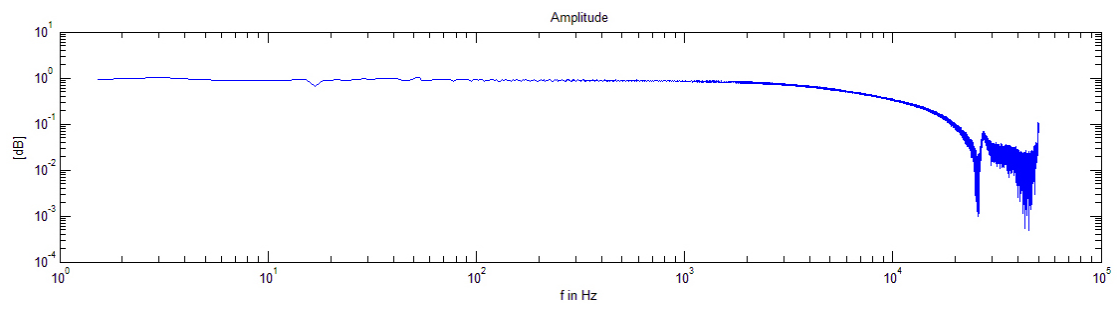


Abbildung D.18.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: schwach

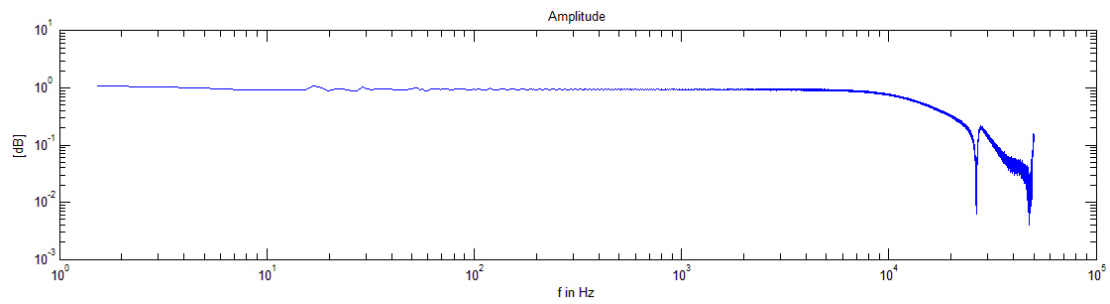


Abbildung D.19.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: mittel

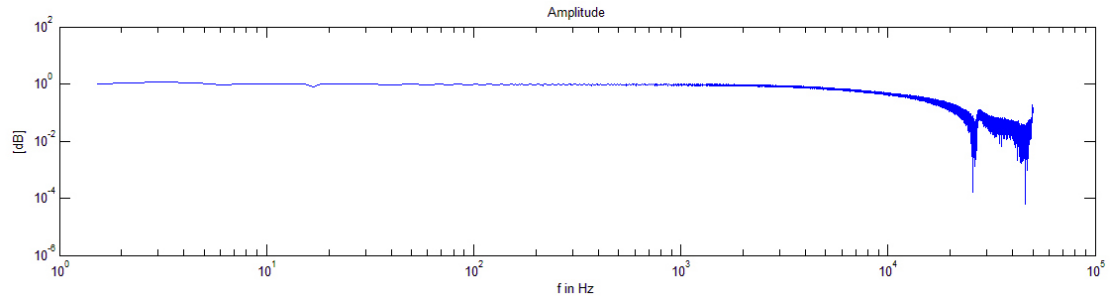


Abbildung D.20.: Material: Edelstahl, Dicke 2 μm , mechanische Spannung: stark

D.3. M71-Kapseln, symmetrisch und asymmetrisch (Prototypen)

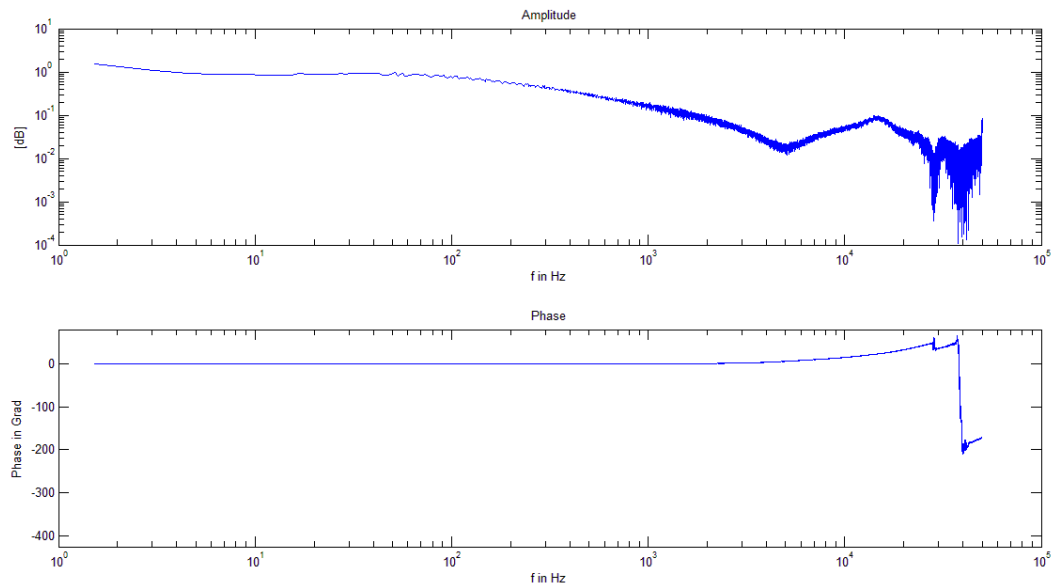


Abbildung D.21.: Übertragungsfunktion M71 sym, optische Messung, Chirp

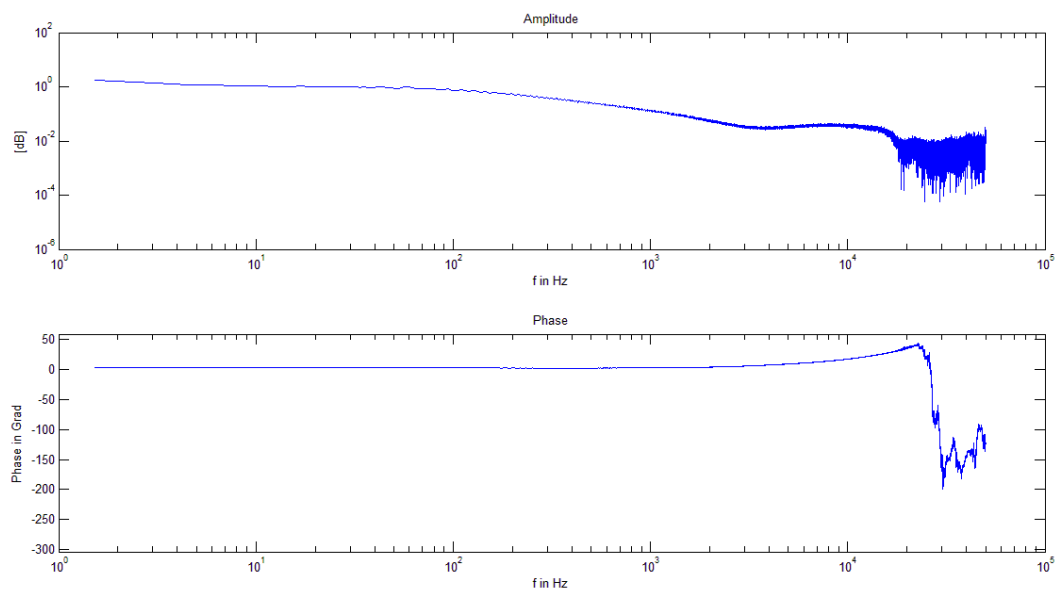


Abbildung D.22.: Übertragungsfunktion M71 asym, optische Messung, Chirp

D.4. M71-Kapseln mit Goldsegmenten (Prototypen)

M71_BIM

Kondensatormikrofon mit Nierencharakteristik

Nr.: 2
Empfindlichkeit: 7.0 mV/Pa = 0 dB
Richtcharakteristik: Niere

Datum: 30.11.2011

Sign.: *B. Heu*

Goldsegment 10°

CE

MICROTECH GEFELL GMBH 

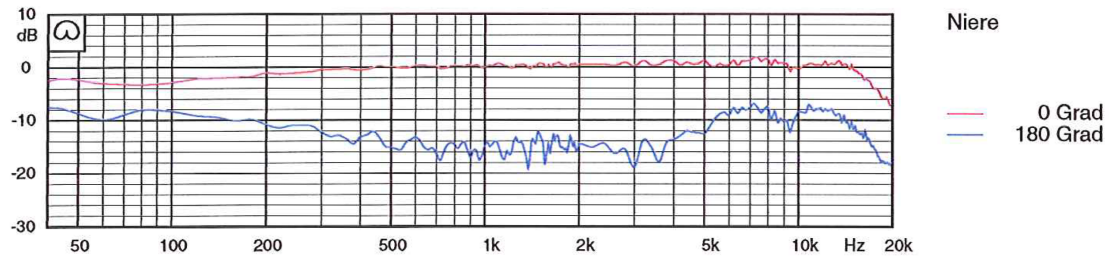


Abbildung D.23.: M71-Kapsel, Goldsegment 10°

M71_BIM

Kondensatormikrofon mit Nierencharakteristik

Nr.: 1
Empfindlichkeit: 7.6 mV/Pa = 0 dB
Richtcharakteristik: Niere

Datum: 30.11.2011

Sign.: *B. Heu*

Gold segment 20°

CE

MICROTECH GEFELL GMBH 

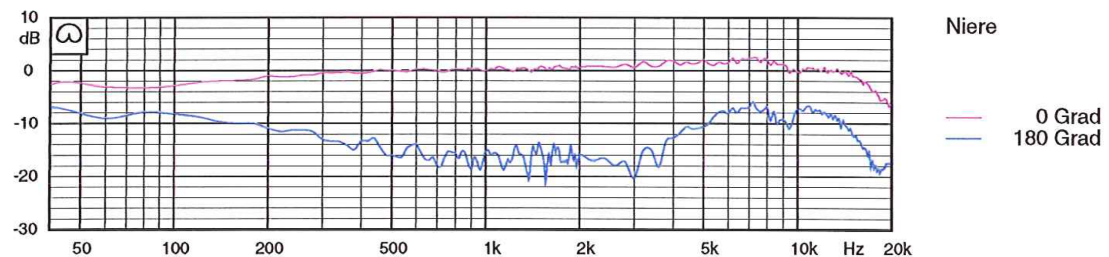


Abbildung D.24.: M71-Kapsel, Goldsegment 20°

M71_BIM

Kondensatormikrofon mit Nierencharakteristik

Nr.: 4
Empfindlichkeit: 6.9 mV/Pa = 0 dB
Richtcharakteristik: Niere

Datum: 30.11.2011

Sign.: *B. Kowus*

MICROTECH GEFELL GMBH



CE

Goldsegment 40°

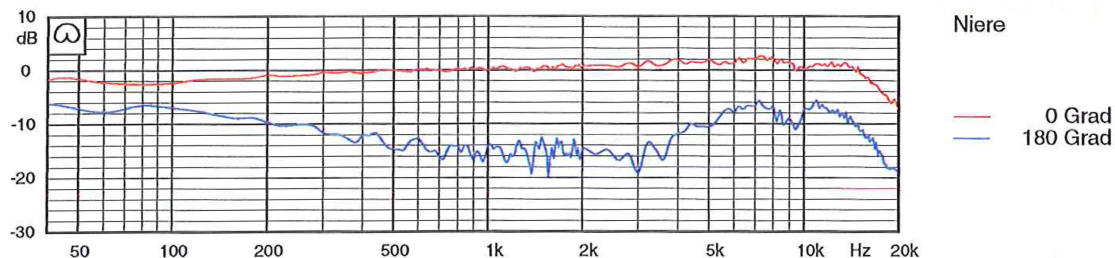


Abbildung D.25.: M71-Kapsel, Goldsegment 40°

M71_BIM

Kondensatormikrofon mit Nierencharakteristik

Nr.: 3
Empfindlichkeit: 6.5 mV/Pa = 0 dB
Richtcharakteristik: Niere

Datum: 30.11.2011

Sign.: *B. Kowus*

MICROTECH GEFELL GMBH



CE

Goldsegment 90°

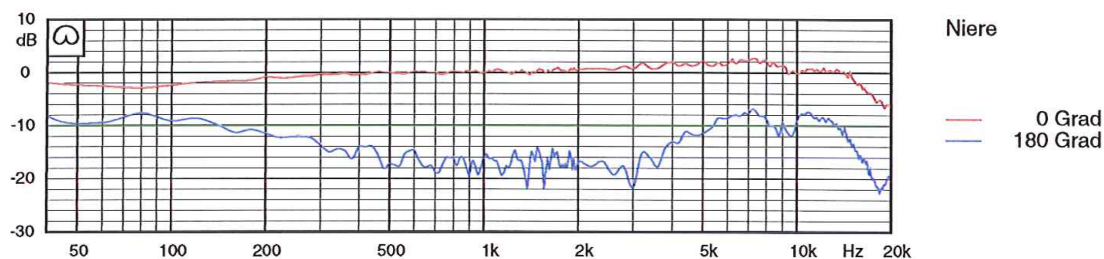


Abbildung D.26.: M71-Kapsel, Goldsegment 90°

D.5. Doppelelektroden-Mikrofon mit segmentierter Elektrode (Neuentwicklung)

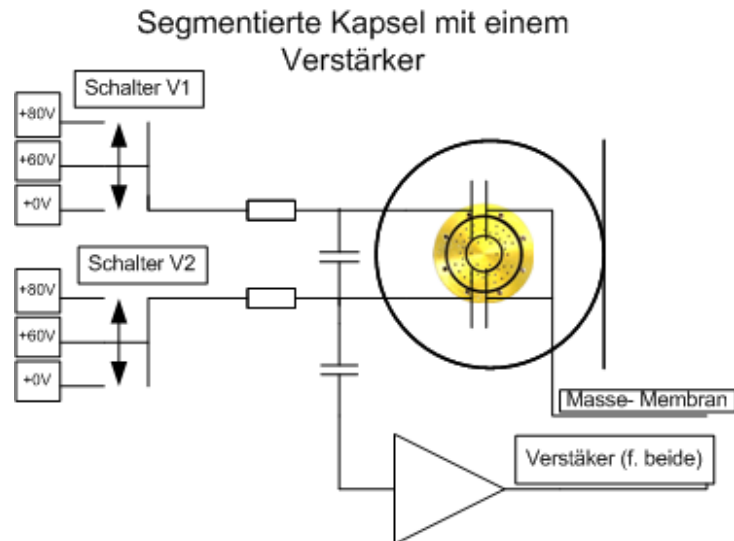


Abbildung D.27.: Segmentierte Elektrode mit einem Verstärker

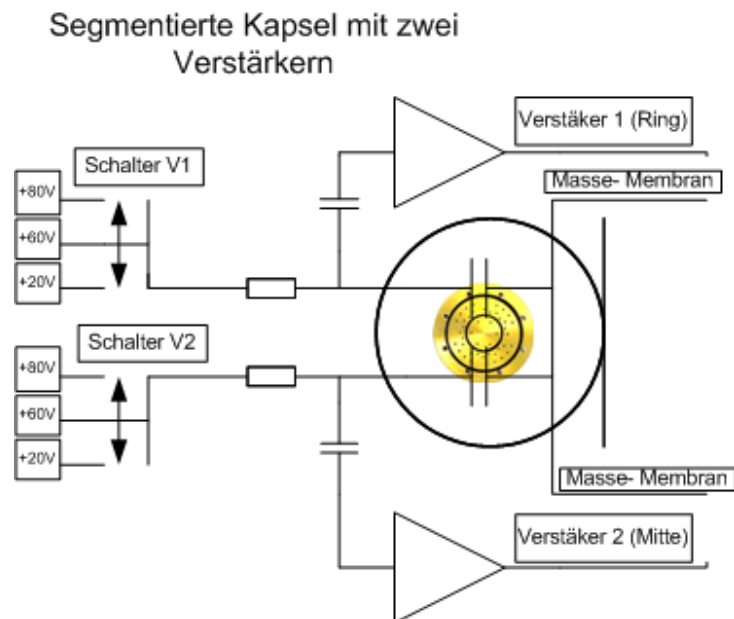


Abbildung D.28.: Segmentierte Elektrode mit zwei Verstärkern



Abbildung D.29.: Kapsel des Doppelelektroden-Mikrofons



Abbildung D.30.: Verstärker des Doppelelektroden-Mikrofons

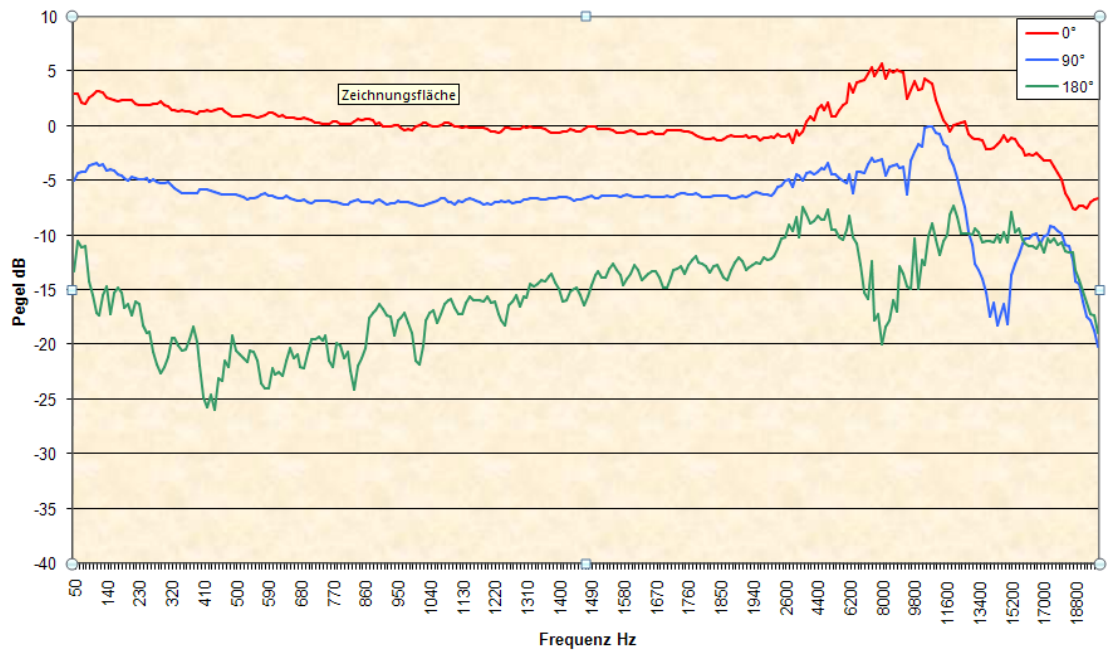


Abbildung D.31.: Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons, "Mitte"

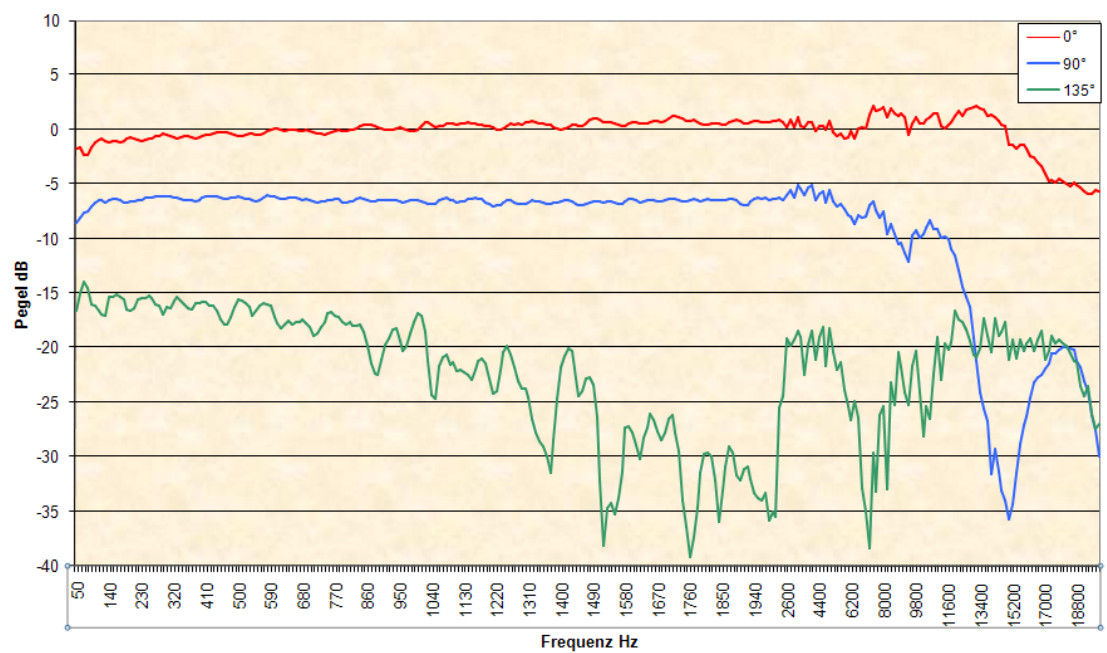


Abbildung D.32.: Amplituden- Frequenzgang des Doppelelektroden-Mikrofons, "Ring"

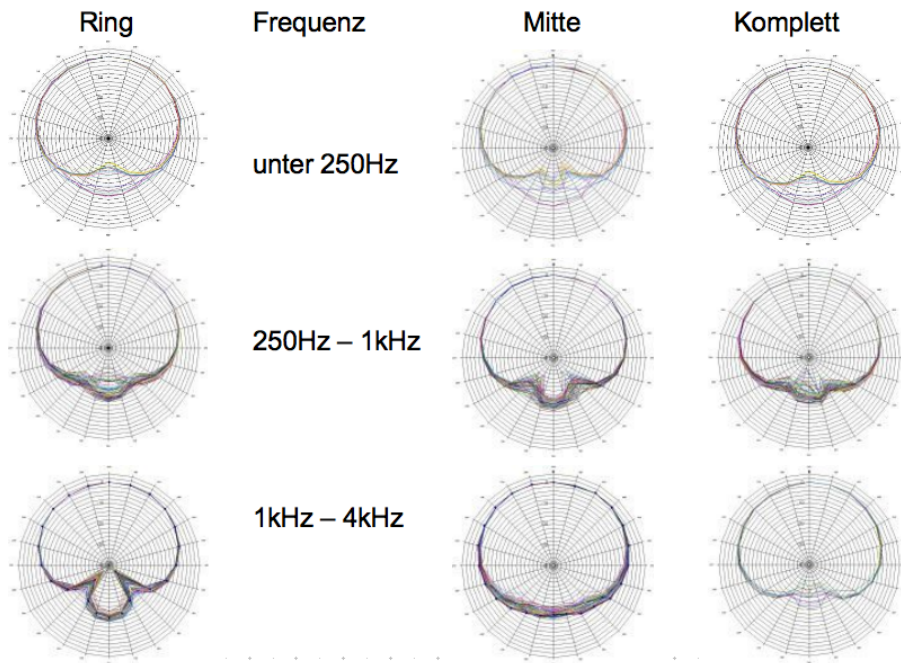


Abbildung D.33.: Polardiagramme des Doppelelektroden Mikrofon, 250 Hz - 4 kHz

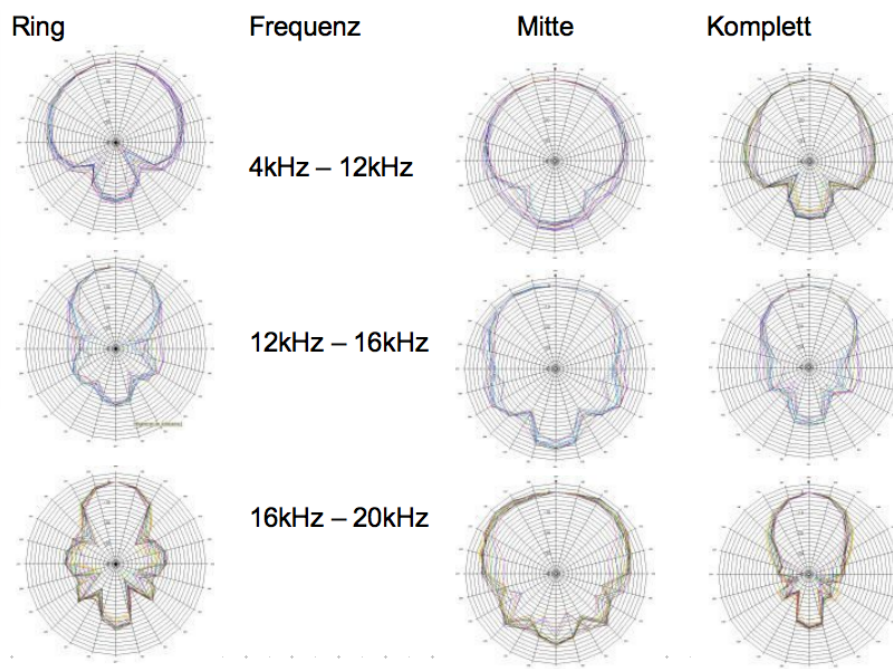


Abbildung D.34.: Polardiagramme des Doppelelektroden Mikrofon, 4 - 20 kHz

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich und unentgeltlich geholfen:

1. Christian Schneiderwind (Student der Medientechnologie an der TU-Ilmenau), Unterstützung bei der Erstellung der Matlab-Routinen zur Auswertung der Messdaten im Rahmen eines bezahlten, universitären Praktikums
2. Bernd Kraus (Microtech Gefell GmbH), Erstellung sämtlicher Messprotokolle aus dem Hause MTG, Umsetzung und Bau des Demonstrators (Doppelelektroden-Mikrofon)

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Oliver Sittler
Ilmenau den 31.03.2014

Thesen

- Nach gebräuchlichen Messmethoden ist es nicht möglich, subjektive Klangeindrücke von Mikrofonen in Messergebnissen festzuhalten. Subjektive Eindrücke entsprechen nicht den elektrisch objektiv messbaren Größen.
- Klangliche Eindrücke von Mikrofonen lassen sich aus den Membranschwingungen ableiten.
- Die Schwingung breitet sich nicht homogen auf einer Membranfläche aus, der Rand schwingt im Vergleich zur Mitte anders.
- Das Wichtige am Klang eines Mikrofons muss nicht die Reaktion der Membran auf einzelne Schwingungen oder Anregungen, sondern vielmehr der Verlauf der Anregung sein. Werden die Transienten nicht originalgetreu wiedergegeben, ist im schlechtesten Falle die Geräuschquelle nicht zu identifizieren. Je genauer somit die Schwingung der Membran der Anregung folgt, umso "natürlicher" und abgrenzbarer - weil "gewohnter" - empfindet das menschliche Ohr später die Wiedergabe des elektrischen Impulses.
- Auf einer ringförmig eingespannten Membran ergeben sich Schwingungsmoden verschiedener Ordnungen.
- Das Membranmaterial hat starken Einfluss auf den Verlauf der Schwingung und somit auch auf den Klang des Wandlers.
- Je höher die Bandbreite des Systems, desto größer ist der transiente Anteil des Klangs im Gesamtklang des Wandlers.
- Durch Evaluierung der Übertragungsfunktionen der einzelnen Kapseltypen wird eine Übertragung des objektiven Klangs auf andere Systeme mittels systemtheoretischer Faltung möglich.
- Eine Schwingungsanalyse von Chirp-Signalen als Anregung erlaubt eine qualitative Schwingungsanalyse für alle Frequenzen innerhalb der Chirp-Grenzen.
- Ein Vergleich zwischen optischer und akustischer Anregung erlaubt eine genauere Analyse des System-, Schwingungs- und Klangverhaltens der Prüflinge im Vergleich zu herkömmlichen Kalibrierverfahren.
- Optische Messungen an schwingenden Membranen eignen sich zur Primärkalibrierung von Mikrofonkapseln.